

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Оренбургский государственный университет»

А.В. Пузаков

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ГЕНЕРАТОРОВ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Монография

Рекомендовано к изданию ученым советом федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения высшего образования
«Оренбургский государственный университет»

Оренбург

2019

УДК 629.33
ББК 39.33-04я73
П 88

Рецензенты:

заведующий кафедрой «Теоретической и общей электротехники» Самарского государственного технического университета д-р техн. наук, профессор В. Н. Козловский;
главный ученый секретарь – начальник отдела диссертационных советов Оренбургского государственного университета д-р. техн. наук, профессор А.П. Фот

П 88 **Пузаков, А. В.**
Прогнозирование работоспособности генераторов транспортных средств [Электронный ресурс]: монография / А. В. Пузаков; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2019. – 332 с.
ISBN 978-5-7410-2332-7

В монографии представлены результаты научных исследований, посвященных вопросам повышения эффективности эксплуатации автомобилей за счёт совершенствования методов обеспечения работоспособности электрооборудования на основе диагностирования и прогнозирования остаточного ресурса генераторов транспортных средств.

Выводы и рекомендации основываются на результатах диагностирования генераторов и могут быть использованы в практике деятельности сервисных и автотранспортных предприятий и в процессе реализации образовательной программы высшего образования по направлению подготовки 23.04.03 Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов.

УДК 629.33

ББК 39.33-04я73

© Пузаков А.В., 2019

© ОГУ, 2019

ISBN 978-5-7410-2332-7

Содержание

Предисловие.....	9
Введение.....	10
Часть 1 Анализ состояния вопроса.....	13
Глава 1 Общие сведения об объекте исследования.....	13
§1 Развитие конструкции генераторов транспортных средств	13
§2 Классификация генераторов транспортных средств.....	22
§3 Конструктивное исполнение генератора с клювообразными полюсами	28
§4 Выводы по главе	39
Глава 2 Характеристика условий эксплуатации автомобильных генераторов	40
§1 Климатические факторы эксплуатации автомобильных генераторов	40
§2 Влияние температура окружающего воздуха	44
§3 Влияние относительной влажности воздуха.....	48
§4 Влияние атмосферного давления	49
§5 Влияние солнечной радиации.....	50
§6 Влияние ветра, пыли и других факторов.....	52
§7 Воздействие эксплуатационных факторов.....	54
§8 Выводы по главе	65
Глава 3 Причины возникновения неисправностей автомобильных генераторов	66
§1 Неисправности электрооборудования автомобилей	67
§2 Неисправности генераторов транспортных средств	70
§3 Выводы по главе	79
Часть 2 Обоснование диагностических параметров генератора.....	81
Глава 4 Диагностирование генераторов транспортных средств	81
§1 Классификация методов и средств диагностирования генераторов транспортных средств	81
§2 Прямые методы диагностирования.....	83

§3 Субъективные методы диагностирования.....	91
§4 Объективные методы диагностирования	93
§5 Осциллографические методы диагностирования.....	112
§6 Выводы по главе	141
Глава 5 Выбор и обоснование диагностических параметров автомобильных генераторов	142
§1 Причинно-следственная связь между элементами и диагностическими параметрами генератора.....	142
§2 Характеристика параметров выходного напряжения генератора ..	146
§3 Выводы по главе	150
Глава 6 Исследование взаимосвязи диагностических и структурных параметров генераторов	151
§1 Обмотка ротора генератора	151
§2 Обмотка статора генератора	155
§3 Выпрямительный блок и щеткодержатель генератора	156
§4 Аналитическое описание взаимосвязи структурных и диагностических параметров генераторов	159
§5 Выводы по главе	162
Часть 3 Разработка математической модели остаточного ресурса генератора	163
Глава 7 Прогнозирование остаточного ресурса.....	163
§1 Методы прогнозирования остаточного ресурса	163
§2 Определение нормативных значений диагностических параметров	172
§3 Выводы по главе	175
Глава 8 Математическая модель остаточного ресурса автомобильных генераторов с учетом условий эксплуатации.....	176
§1 Математическая модель интенсивности изменения ресурса от факторов эксплуатации	176
§2 Математическая модель остаточного ресурса	180
§3 Разработка алгоритма прогнозирования остаточного ресурса	184
§4 Выводы по главе	186

Часть 4 Методика и результаты экспериментальных исследований.....	187
Глава 9 Проведение экспериментальных исследований	187
§1 Общая методика экспериментальных исследований	187
§2 Разработка аппаратного обеспечения экспериментальных исследований	192
§3 Выводы по главе	197
Глава 10 Методика определения диагностических параметров генератора в процессе физического моделирования неисправностей	198
§1 Методика физического моделирования неисправностей автомобильного генератора	199
§2 Методика определения диагностических параметров автомобильных генераторов при изменении структурных параметров	205
§3 Выводы по главе	210
Глава 11 Методика экспресс-диагностирования автомобильных генераторов в процессе эксплуатации	210
§1 Разработка экспресс-метода диагностирования генераторов	210
§2 Определение достоверности предлагаемого метода диагностирования	217
§3 Выводы по главе	221
Глава 12 Методика определения теплового состояния автомобильных генераторов.....	221
§1 Методика определения теплового состояния автомобильных генераторов в лабораторных условиях.....	223
§2 Методика определения теплового состояния автомобильных генераторов в производственных условиях	226
§3 Выводы по главе	233
Часть 5 Анализ результатов экспериментальных исследований	234
Глава 13 Анализ результатов определения взаимосвязи диагностических и структурных параметров	234
§1 Обрыв диода выпрямителя	234
§2 Обрыв обмотки ротора	238
§3 Межвитковое замыкание фазы обмотки статора.....	241

§4 Короткое замыкание диода	243
§5 Обрыв фазы обмотки статора	246
§6 Межфазное замыкание обмотки статора.....	248
§7 Замыкание фазы обмотки статора на корпус	250
§8 Результаты определения границ возникновения и развития неисправностей генератора.....	252
§9 Выводы по главе	255
Глава 14 Анализ результатов экспресс-диагностирования генераторов	255
§1 Изменение диагностического параметра в процессе эксплуатации	255
§2 Зависимость ресурса работы генератора от значений факторов эксплуатации	260
§3 Выводы по главе	264
Глава 15 Анализ результатов определения теплового состояния автомобильных генераторов	264
§1 Анализ результатов определения теплового состояния генератора в лабораторных условиях.....	264
§2 Анализ результатов определения теплового состояния генератора в производственных условиях	269
§3 Выводы по главе	277
Часть 6 Практическое использование результатов исследований	279
Глава 16 Методика оценки и прогнозирования остаточного ресурса автомобильных генераторов	279
§1 Методика определения значений факторов условий эксплуатации	281
§2 Прогнозирование остаточного ресурса автомобильных генераторов на основе разработанного алгоритма.....	291
§3 Выводы по главе	295
Глава 17 Определение оптимальной периодичности диагностирования автомобильных генераторов	295
§1 Методы определения периодичности диагностирования.....	295
§2 Определение периодичности диагностирования.....	301

§3 Оценка экономической эффективности от использования результатов исследований.....	305
§4 Выводы по главе	308
Заключение	309
Список использованных источников	312
Приложение А Характеристика диагностических параметров.....	323
Приложение Б Осциллограммы выходного напряжения.....	326
Приложение В Статистические характеристики распределения диагностического параметра.....	327
Приложение Г Среднемесячная температура в г. Оренбурге	330
Приложение Д Определение предельных и предельно-допустимых значений диагностического параметра.....	331

Всякое новое качество есть лишь результат
накопившихся количественных изменений

Г. Гегель

Предисловие

В последнее время наблюдается значительное количество научных исследований, связанных с генераторами транспортных средств, в частности, с автомобильными генераторами. Одна часть работ посвящена совершенствованию конструкции генераторов и повышению надежности его элементов, другая – расчетным методикам проектирования, третья – проблемам диагностирования технического состояния.

Большинство исследований по диагностированию основано на анализе силы тока и выходного напряжения генератора, что обусловлено сравнительно небольшой трудоёмкостью и высокой информативностью этих диагностических параметров.

Отличием данной работы является использование результатов диагностирования не только для текущей оценки технического состояния или ресурса работы генератора, но и для прогнозирования их изменения на заданном интервале пробега.

Автор выражает признательность рецензентам издания, замечания и пожелания которых позволили улучшить форму представления материала.

О замеченных недостатках в тексте просьба сообщать на кафедру технической эксплуатации и ремонта автомобилей ФГБОУ ВО «Оренбургского государственного университета» (460018, г. Оренбург, пр. Победы, 13, кафедра технической эксплуатации и ремонта автомобилей, tera@mail.osu.ru). Автор с благодарностью примет и рассмотрит любые предложения, направленные на улучшение издания.

Введение

Совершенствование конструкции транспортных средств приводит к неуклонному возрастанию количества и установленной мощности потребителей электроэнергии. За последние 15 лет мощность потребителей возросла в 4 раза и продолжает увеличиваться. Электроэнергия используется для функционирования силовой установки, трансмиссии и ходовой части; автоматизации рабочих процессов; создания комфортных условий для водителя и пассажиров, а также обеспечения безопасности движения.

Развитие электронных устройств, отвечающих за безопасность движения, перспективой которого являются полностью автономные транспортные средства, требует ужесточения требований к бесперебойности снабжения электроэнергией. Несмотря на появление новых устройств, обеспечивающих выработку и хранение электроэнергии на борту транспортных средств (топливные элементы, ионисторы), наиболее востребованными остаются аккумуляторные батареи и генераторные установки.

Основным источником тока принято считать генераторную установку (генератор), которая снабжает электроэнергией потребители, включенные в бортовую сеть транспортного средства, и заряжает аккумуляторную батарею. Неисправность генератора может повлечь последствия разной тяжести: от выхода из строя аккумуляторной батареи или электронных устройств до возникновения дорожно-транспортного происшествия.

Попытки обеспечить транспортное средство резервными источниками питания нельзя признать успешными, так как ряд ответственных потребителей (электроусилитель рулевого управления, активная подвеска и другие) способны полностью их исчерпать всего за несколько минут.

Таким образом, генератор является ключевым элементом, обеспечивающим электровооруженность транспортных средств, безопасность водителя и пассажиров, сохранность груза и т. п. В связи с этим возникает необходимость в получении оперативной и достоверной информации о его работоспособности.

Предписанные руководствами по эксплуатации методы диагностирования имеют высокую трудоёмкость (свыше 1,1 чел.-часа) и не позволяют определять неисправности на ранней степени развития, вследствие чего, выход генераторов из строя, как правило, оказывается внезапным. Высокой информативностью и достоверностью диагностирования обладают параметры колебательных процессов, однако отсутствие разработанных и апробированных методик не позволяет внедрить оценку технического состояния генераторов в практику технического обслуживания транспортных средств.

Предложенный автором экспресс-метод диагностирования генераторов транспортных средств по параметрам колебательных процессов послужил основой для разработки методики оценки и прогнозирования остаточного ресурса генераторов, построенной на результатах диагностирования и учёте условий эксплуатации.

При эксплуатации транспортных средств оперативных служб, военной техники и т. п. целесообразным является непрерывный мониторинг не только уровня напряжения бортовой сети, но и состояния работоспособности генератора. Это позволит повысить эффективность эксплуатации транспортных средств за счёт снижения простоев в ремонте.

Своевременное определение технического состояния генераторов является необходимым, но недостаточным условием эффективной эксплуатации транспортных средств, так как вариация погодноклиматических и эксплуатационных факторов, а также заложенной на этапе производства надёжности приводит к разной скорости изменения остаточного ресурса.

Прогнозирование работоспособности на основе учета изменения диагностических параметров позволяет не только оценить остаточный ресурс генераторов с учётом вышеперечисленных условий, но и его уменьшение на интервале межсервисного пробега.

Результаты использованы для определения оптимальной периодичности диагностирования генераторов с целью полной реализации остаточного ресурса, что подтверждается успешным внедрением в процедуру технического обслуживания автомобилей на автотранспортных и сервисных предприятиях.

Часть 1 Анализ состояния вопроса

Глава 1 Общие сведения об объекте исследования

§1 Развитие конструкции генераторов транспортных средств

Развитие и совершенствование автомобилестроения неразрывно связано с широким применением электротехнического оборудования, автоматических устройств и систем, объединённых в единый комплекс электрооборудование автомобилей. Электрооборудование современного автомобиля — сложная система, обеспечивающая автоматизацию рабочих процессов, безопасность движения и улучшение условий труда водителей. Развитие электрооборудования автомобилей тесным образом связано с развитием общей электротехники, электроники и автоматики. Впервые электрическая энергия применена в двигателях внутреннего сгорания в 1860 г. для воспламенения горючей смеси.

Источником электроэнергии являлся долгое время являлся аккумулятор, на восстановление заряда которого уходило немало времени.

Однако никакая батарея или аккумуляторный элемент не может дать больше некоторого количества энергии, и изобретатели вскоре осознали, что нужен постоянный источник электрического тока.

Первым успешным генератором стала разработка немца Эрнста Вернера фон Сименса. Он создал свой генератор в 1867 г. и назвал его динамо-машиной. Сегодня термин «динамо» применяется только для генератора, который вырабатывает постоянный электрический ток, а термин «генератор» (от англ. *alternator*) подразумевает только машины переменного тока.

Эмиль Морс использовал электрическое зажигание, подключённое к цепи низкого напряжения, питаемой аккумуляторами, которые подзаряжались от динамо-машины, приводимой в движение ремённой

передачей. Это была первая успешная зарядная система, она может быть датирована примерно 1895 г.

Трехщёточный генератор, разработанный доктором Гансом Лейтнером и Р.Г. Лукасом, впервые появился примерно в 1905 г. Он дал водителю некоторую возможность управления системой подзаряда. По современным меркам это был очень крупный генератор, но он мог вырабатывать ток только около 8 А (рисунок 1.1).

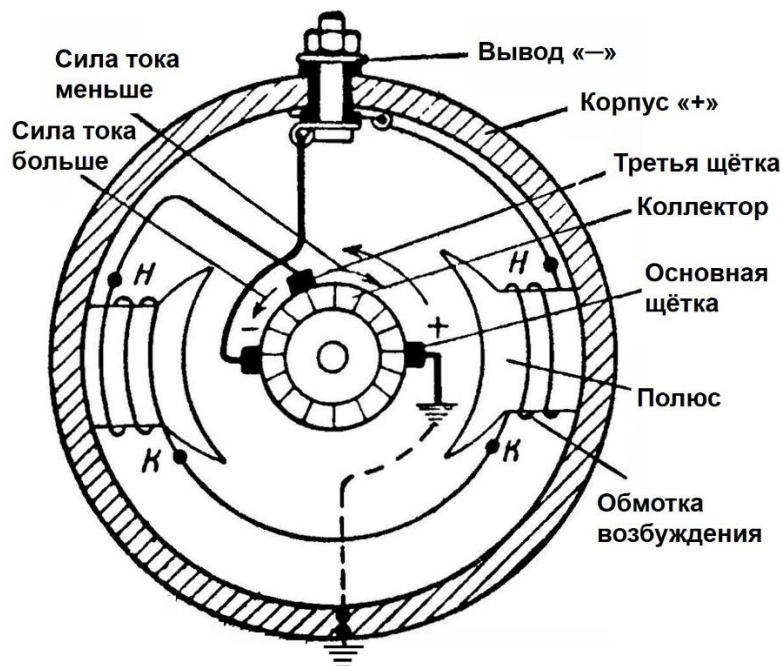


Рисунок 1.1 – Схема трехщёточного генератора

В течение следующего десятилетия было опробовано много других технических приёмов, призванных решить проблему регулировки мощности при постоянно меняющейся скорости генератора.

Одной из идей была нагреваемая спираль в главной цепи питания, которая при нагреве увеличивала свое сопротивление и вынуждала электрический ток течь в обход неё через шунтирующую катушку, уменьшая поле подмагничивания динамо-машины.

Однако управление зарядом батареи для всех этих систем постоянного тока было несовершенным, и часто на водителя возлагалась обязанность включать и выключать ток заряда при достижении высокого и

низкого предельных значений. По сути, одним из ранних видов оснащения на приборной доске был указатель уровня электролита, чтобы контролировать состояние заряда батареи.

Двухщёточная динамо-машина и блок контроля напряжения с компенсацией были впервые использованы в 1930-х гг. Это дало значительно лучший контроль над процессом заряда и подготовило почву для возникновения многих других электрических систем.

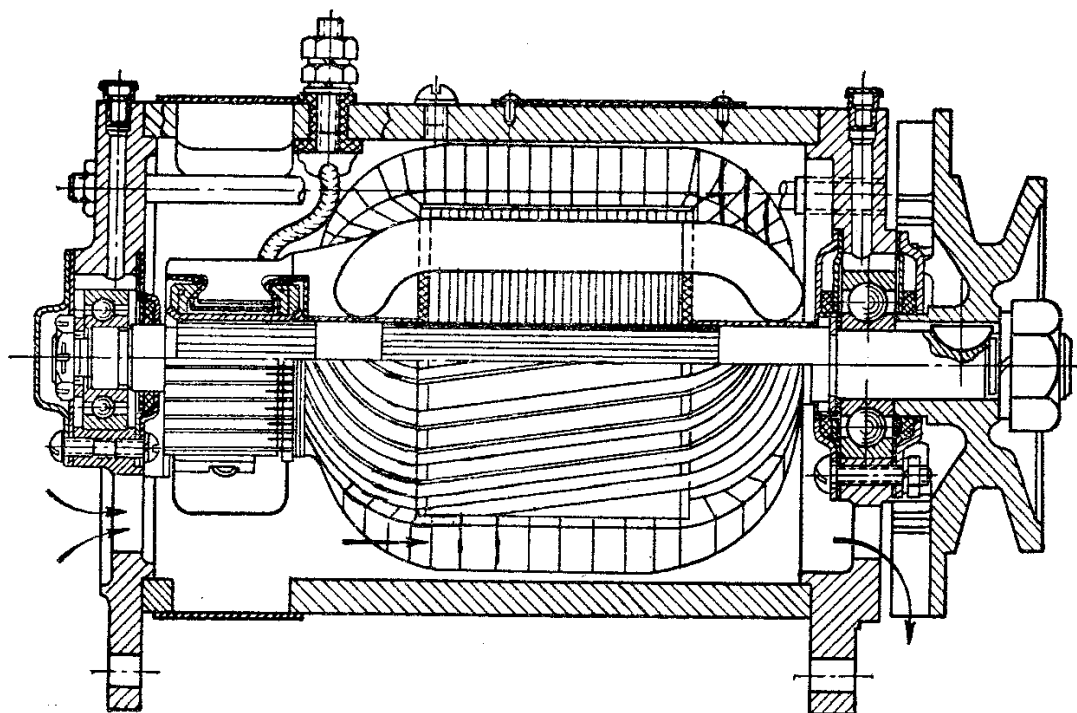


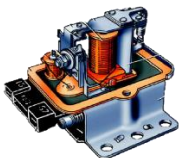
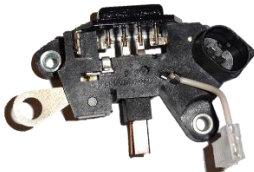
Рисунок 1.2 – Генератор постоянного тока (динамо-машина)

Генератор переменного тока, впервые использованный в 60-е годы в США к 1974 г. стал нормой и в Европе.

Большая доступная мощность и стабильность генератора переменного тока стали тем, чего именно и ждала электронная индустрия, и к 80-м годам электрические системы значительно изменились.

Дальнейшее совершенствование конструкции генераторов переменного тока было связано с применением более качественных изоляционных и полупроводниковых материалов, а также изменением конструктивного исполнения регуляторов напряжения.

Таблица 1.1 – Совершенствование регуляторов напряжения генераторов транспортных средств

Поколение регулятора	Годы применения	Изображение	Достоинства	Недостатки
1	2	3	4	5
1 – Контактный (вибрационный)	1977 - 1984		ремонтпригодность; возможность ручной регулировки уровня напряжения	большие габариты и масса; низкая надежность
2 – Контактнотранзисторный	1980 - 1990		ремонтпригодность; возможность ручной регулировки уровня напряжения; увеличенный срок службы	очень большие габариты и масса (≈ 1 кг); недостаточная надёжность
3 – Бесконтактный на гибридных схемах	1988 - 1993		ремонтпригодность; увеличенный срок службы; уменьшены габариты и масса	невозможна ручная регулировка уровня напряжения
4 – Бесконтактный на интегральных схемах	1992 - 2000		большой срок службы; малые габариты и масса; встроен в генератор	невозможна ручная регулировка уровня напряжения; не ремонтпригодность
5 – Бесконтактный на микросхеме	1999 - наши дни		большой срок службы; малые габариты и масса; встроен в генератор; автоматическая термокомпенсация напряжения	невозможна ручная регулировка уровня напряжения; не ремонтпригодность
5 плюс – Бесконтактный многофункциональный	2009 – наши дни		большой срок службы; малые габариты и масса; дополнительные функции; встроенный конденсатор	не ремонтпригодность; сложность диагностики

Согласно проф. В.Е. Ютту различия в терминах «генераторная установка» и «генератор» заключаются в том, что генератор не содержит регулятора напряжения, тогда как генераторная установка объединяет в своем составе генератор и регулятор напряжения.

Однако в настоящее время абсолютное большинство выпускаемых в нашей стране и за рубежом автомобилей штатно комплектуются именно генераторными установками, лишь малую часть генераторов большой мощности (например, используемых при тюнинге акустических систем) оборудуют вынесенными регуляторами напряжения. Поэтому между терминами «генератор» и «генераторная установка» в большинстве случаев можно поставить знак равенства. Далее в работе использован термин «генератор».

Существенное изменение конструкции генераторов произошло на рубеже начала 21 века, когда появились так называемые компакт-генераторы, обладающие измененной системой охлаждения, контактными кольцами, вынесенными за пределы задней крышки и приводимые во вращение поликлиновым ремнем, допускающим большее передаточное отношение.

Взаимосвязь тенденций совершенствования генераторов и транспортных средств в целом с изменениями в конструкции генераторов представлена на рисунке 1.3.

Увеличение мощности потребителей связано с ростом числа агрегатов и систем автомобиля, отвечающих за безопасность движения, автоматизацию рабочих процессов, комфортабельность салона и т. д. Мировая тенденция роста мощности потребителей электроэнергии на борту автомобилей составляет 15 – 20% за каждые 3 – 4 года. Это подтверждается ростом мощности генераторов автомобилей ВАЗ за последние 15 лет (рисунок 1.4).

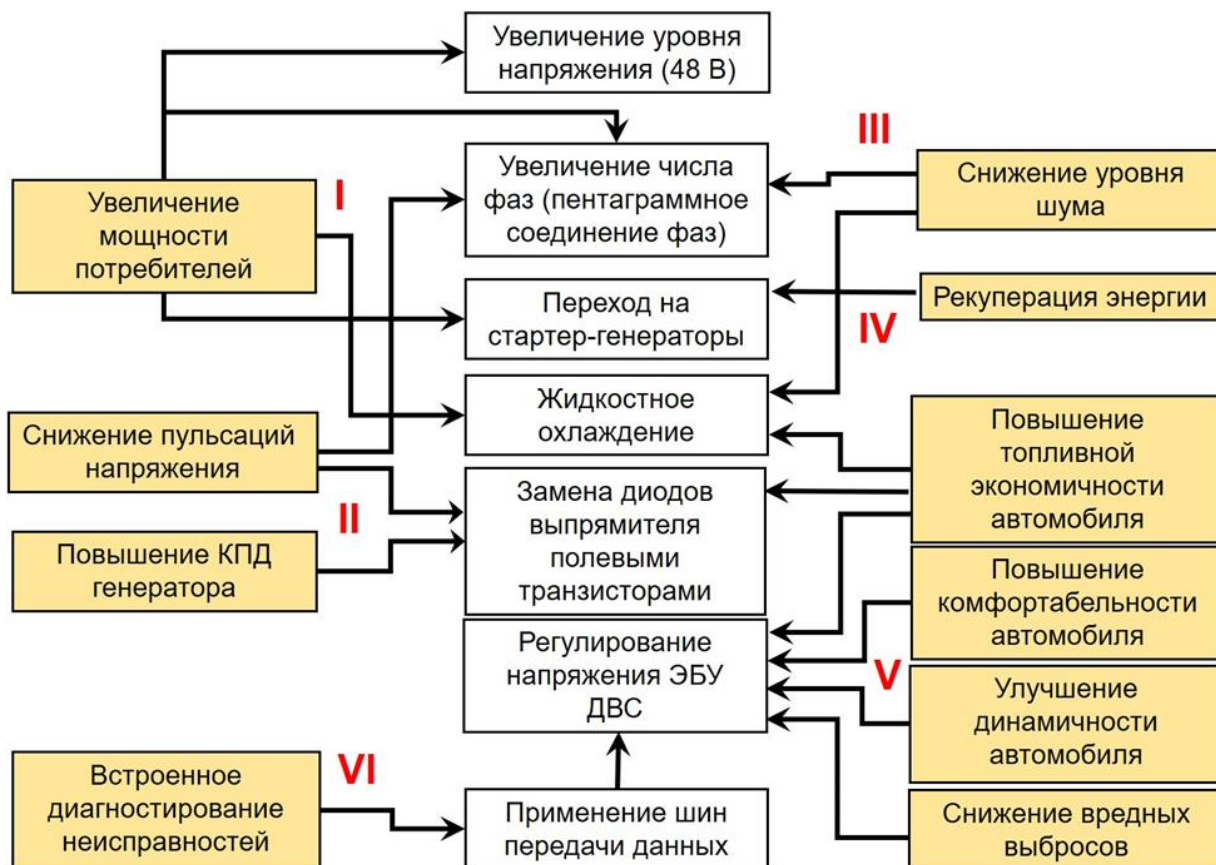


Рисунок 1.3 – Тенденции совершенствования генераторов транспортных средств

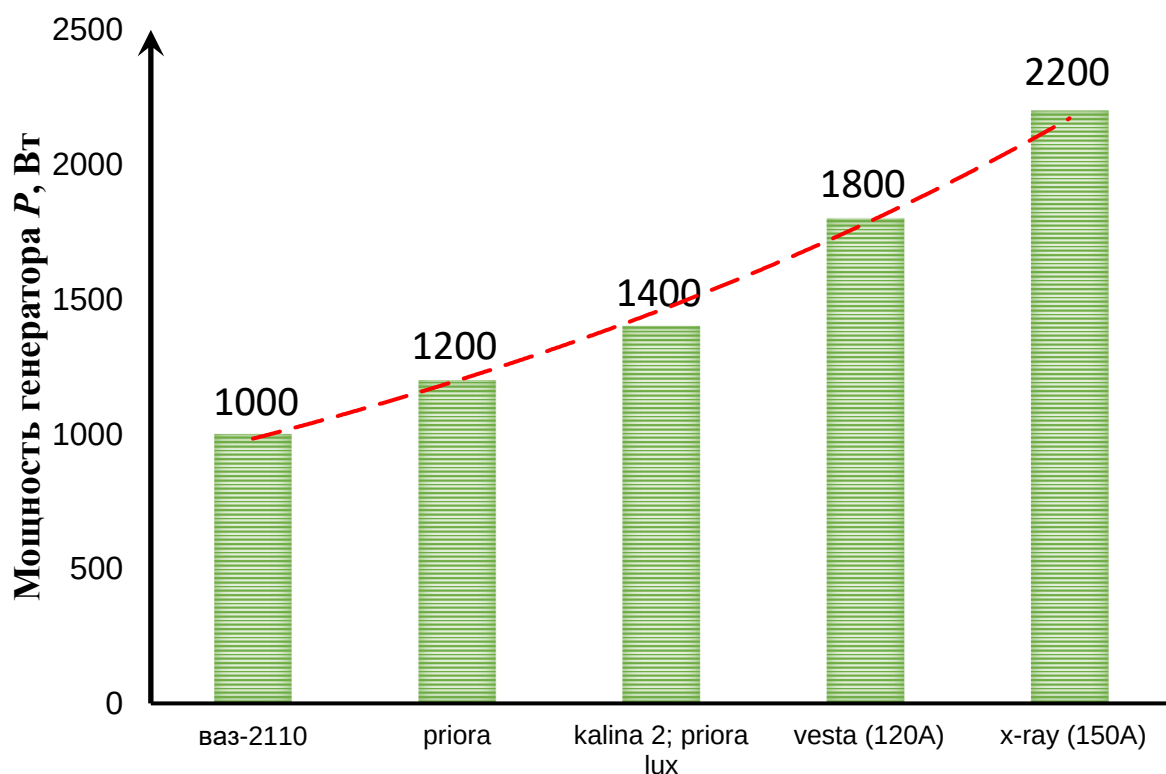


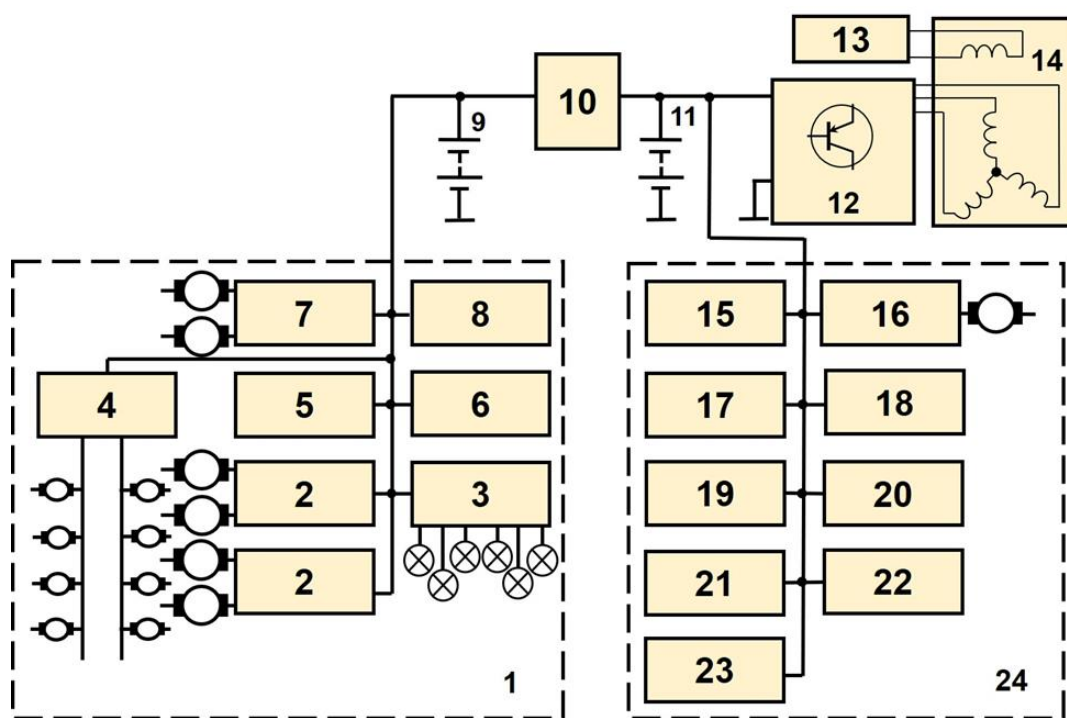
Рисунок 1.4 – Динамика мощности генераторов автомобилей ВАЗ

Генераторы фирмы Bosch серии EL содержат пять фаз, что позволило снизить толщину обмоточного провода, повысить число витков обмотки статора, а, следовательно, и номинальную мощность. Пентаграммное соединение фаз способствовало снижению уровня шума и пульсаций выпрямленного напряжения. Также в генераторах данной серии выпрямительные диоды заменены полевыми транзисторами, что снизило потери напряжения и повысило коэффициент полезного действия (КПД) генераторов.

Рост мощности генераторов при сохранении воздушного охлаждения ограничен величиной 3 – 4 кВт, поэтому ряд производителей (Audi, BMW) автомобили представительского класса штатно оборудуют генераторами жидкостного охлаждения, что улучшает теплоотвод, способствует снижению уровня шума и повышает коэффициент полезного действия.

Увеличение мощности потребителей приводит к увеличению сечения проводов, длина которых в современном автомобиле может достигать нескольких километров. Для снижения токов, циркулирующих в бортовой сети необходимо увеличение напряжения бортовой сети. В настоящее время разработаны схемы перехода на напряжение 48 В, а в ряде случаев (автомобили Audi SQ7, Bentley Bentayga, Lamborghini Urus) такой переход частично реализован для ряда энергоёмких потребителей (рисунок 1.5).

Дальнейшее увеличение мощности возможно при замене генераторов на устройства, совмещающее функции генерирования энергии и запуска двигателя внутреннего сгорания (ДВС) – стартер-генераторы. Применение подобных устройств позволяет использовать рекуперацию энергии – преобразование накопленной кинетической энергии в электрическую в процессе замедления и торможения автомобиля.



1 – потребители малой и средней мощности; 2 – электропривод блокировки дверей; 3 – система освещения и световой сигнализации; 4 – электропривод климатической установки; 5 – центральный замок; 6 – система управления двигателем; 7 – стеклоочистители; 8 – приборная панель информационной системы; 9 – аккумуляторная батарея напряжением 12 В; 10 – обратимый преобразователь постоянного тока; 11 – аккумуляторная батарея напряжением 48 В; 12 – управляемый инвертор постоянного тока в переменный и переменного тока в постоянный; 13 – электронный блок управления стартерным и генераторным режимами; 14 – стартер-генератор, интегрированный в маховик двигателя внутреннего сгорания; 15 – система управления активной подвеской с электроприводом; 16 – электро-вентилятор системы охлаждения двигателя; 17 – электропривод механизма газораспределения двигателя; 18 – электропривод водяного насоса; 19 – электроусилитель руля; 20 – антиблокировочная система торможения; 21 – электроподогрев каталитического нейтрализатора отработавших газов; 22 – электрообогрев стекол; 23 – электроподогрев сидений; 24 – потребители большой мощности.

Рисунок 1.5 – Двухуровневая бортовая сеть с двумя аккумуляторными батареями напряжением 12 и 48 В

Большие перспективы дает передача функций регулирования напряжения электронному блоку управления (ЭБУ) двигателя внутреннего сгорания. Это позволяет:

- отключить потребители с низким приоритетом для сохранения заряда аккумуляторной батареи и повышения топливной экономичности автомобиля;

- повысить частоту вращения холостого хода при неблагоприятных условиях (холодный запуск ДВС) для ускорения прогрева ДВС и салона, что способствует снижению вредных выбросов и повышению комфортабельности автомобиля;

- полностью отключить генератор, например, во время разгона, для повышения динамических качеств автомобиля, так как известно, что на привод генератора затрачивается до 10% мощности ДВС.

Встроенное диагностирование неисправностей становится возможным при соблюдении двух условий: передаче функций регулирования ЭБУ ДВС и связи этого блока с генератором посредством шины передачи данных (как правило, LIN-шины) (рисунок 1.6). Так, могут быть переданы следующие коды неисправности:

- отсутствует связь между регулятором и ЭБУ ДВС;
- отсутствует выходное напряжение генератора из-за механической неисправности (например, порван приводной ремень);
- потеря электрического соединения с генератором;
- система испытывает перегрузку из-за короткого замыкания или обрыв цепи обмотки возбуждения;
- повреждение обмотки ротора или статора;
- пробой диода.

Однако большинство зарубежных автомобилей и все отечественные не удовлетворяют вышеприведенным условиям, поэтому разработка метода и методики диагностирования автомобильных генераторов в эксплуатации без снятия с автомобиля является по-прежнему актуальной задачей.

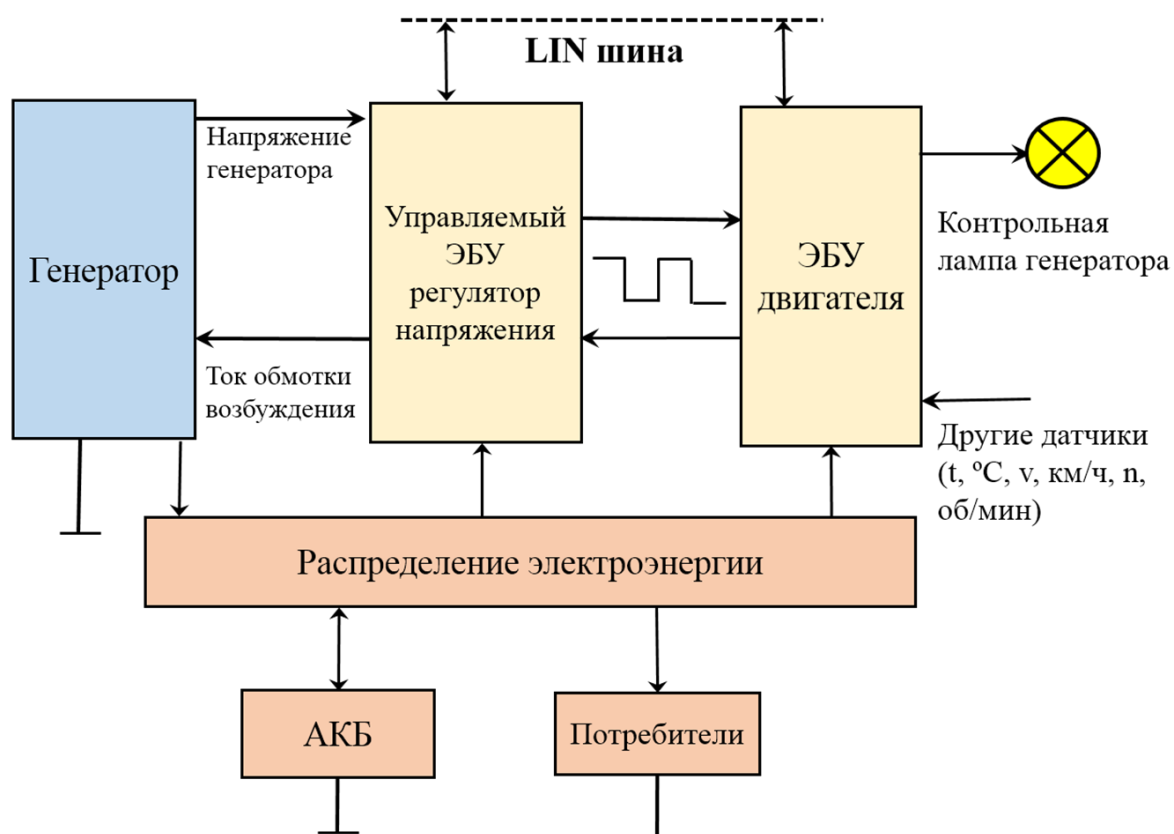


Рисунок 1.6 – Управление генератором электронным блоком управления двигателем транспортного средства

Для обоснования выбора объекта исследования разработана классификация генераторов транспортных средств, содержащая большинство значимых признаков с выделением наиболее распространенных из них в настоящее время.

§2 Классификация генераторов транспортных средств

Автомобильные генераторы классифицируются по принципу действия, конструктивным отличиям, электрической схеме, способу охлаждения, типу привода и ряду других признаков. В работе В.Ю. Гумелёва «Классификация автотракторных генераторов» приведена классификация генераторов военной автомобильной техники (рисунок 1.7), причем основное внимание уделено их конструктивным отличиям и степени

защиты от внешних воздействий. Однако компактные генераторы всех легковых автомобилей с воздушным охлаждением имеют степень защиты IP20 и выделять этот признак в качестве классификационного нецелесообразно.

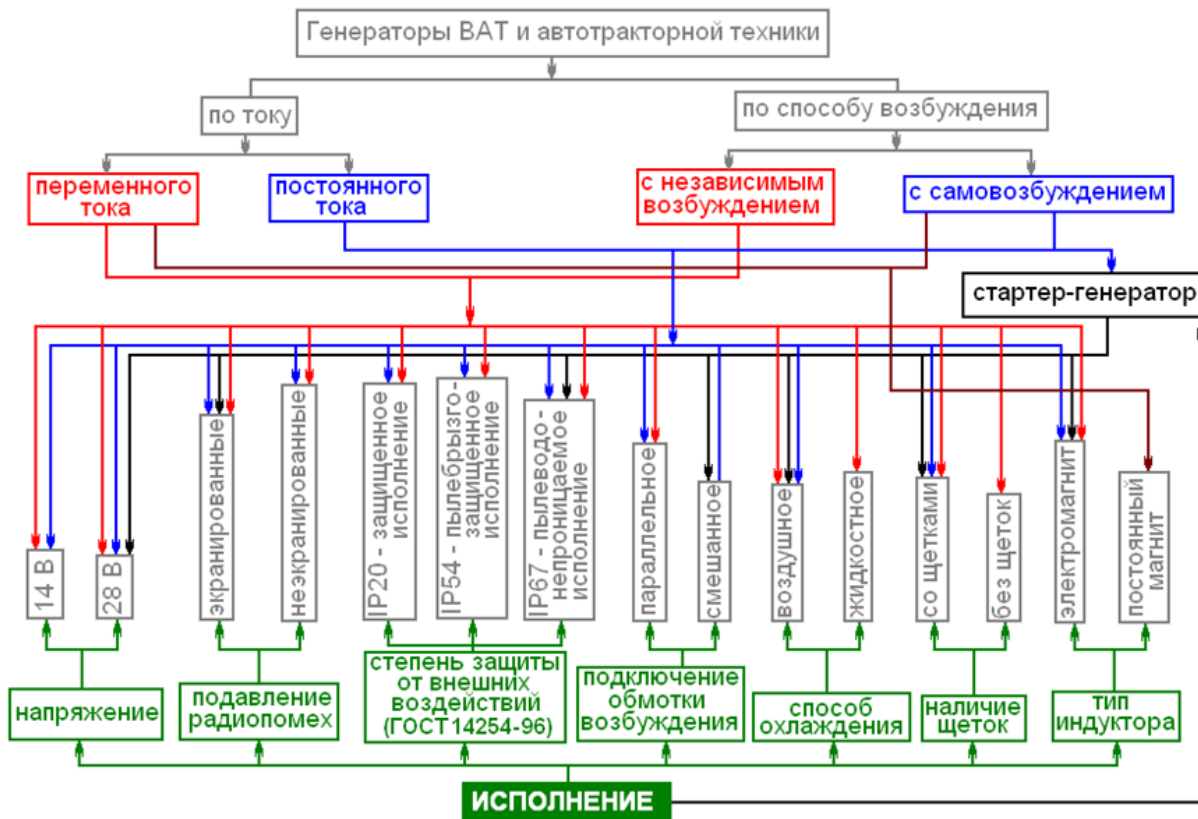


Рисунок 1.7 – Классификация генераторов военной автомобильной техники [В.Ю. Гумелёв]

Классификация автотракторных генераторов (рисунок 1.8), представленная в работе [15] также не лишена недостатков, так как в основном, отражает отличия в электрической схеме.

Для обоснования выбора объекта исследования была разработана новая классификация современных автомобильных генераторов, содержащая большинство значимых признаков с выделением наиболее распространенных из них в настоящее время. Разработанная классификация представлена на рисунке 1.9.

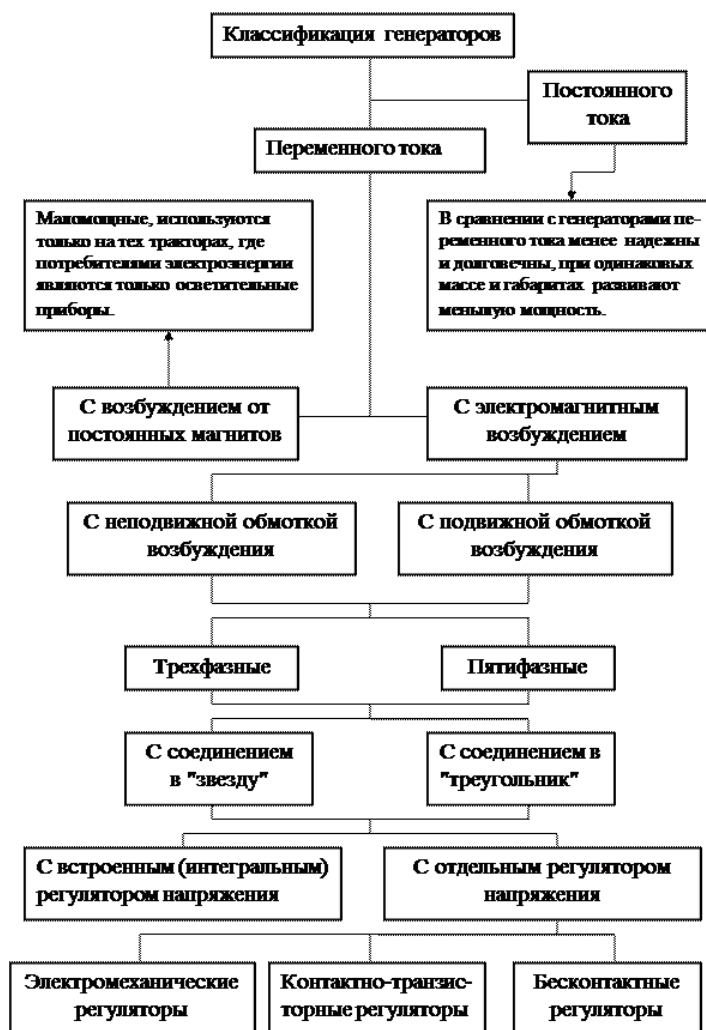


Рисунок 1.8 – Классификация автотракторных генераторов [15]

Генераторы постоянного тока в настоящее время на автомобилях не применяются, так как были вытеснены синхронными вентильными генераторами. Асинхронные генераторы находят ограниченное применение, в основном, в качестве стартер-генераторов, используемых в гибридных автомобилях.

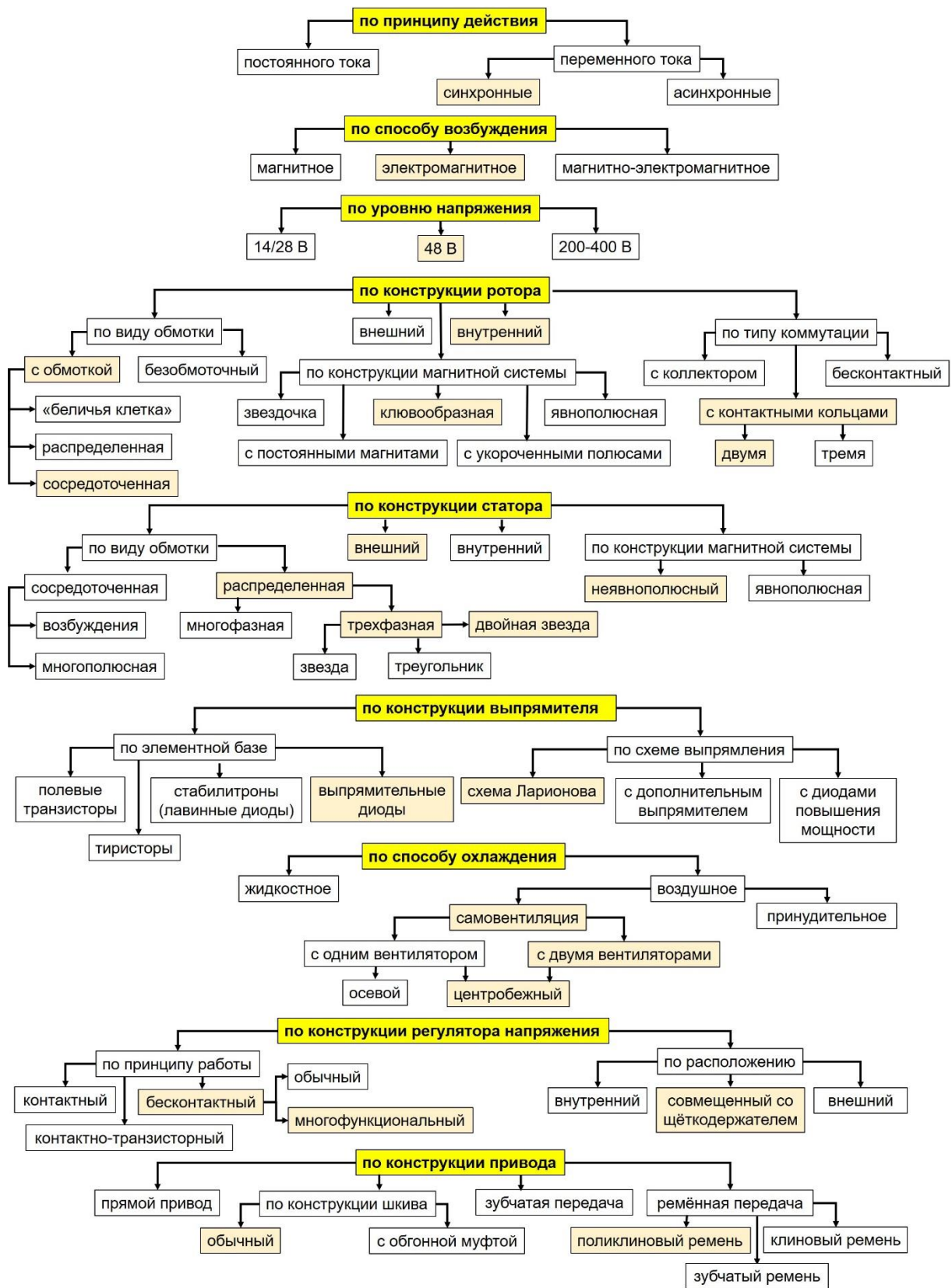


Рисунок 1.9 – Классификация генераторов транспортных средств

Для создания основного магнитного поля в генераторах могут использоваться постоянные магниты (магнитное возбуждение), обмотка

возбуждения (электромагнитное возбуждение) или их комбинация (магнитно-электромагнитное возбуждение).

Недостатком магнитного возбуждения является прямая зависимость выходного напряжения генератора от частоты вращения ротора генератора. Для регулирования напряжения в этом случае необходимо периодически прерывать ток в обмотке статора, что сопряжено с большими пульсациями напряжения. Такое возбуждение получило практическое применение на только мотоциклах с небольшим рабочим объемом двигателя.

Магнитно-электромагнитное возбуждение широко применяется на индукторных генераторах и в ряде стартер-генераторов. Достоинством такого конструктивного решения можно считать возможность работы транспортного средства без аккумуляторной батареи, недостатком – ограничение диапазона регулирования тока возбуждения. Для устранения данного недостатка в генераторе размещают размагничивающую обмотку, нейтрализующую действие постоянных магнитов на высоких оборотах генератора.

Генераторы легковых автомобилей, грузовых автомобилей небольшой грузоподъемности и автобусов небольшой пассажироместимости, как правило, рассчитаны на номинальное напряжение бортовой сети 14 В; остальных автомобилей – на 28 В. Ряд легковых автомобилей премиум-класса оснащаются генераторами с номинальным напряжением 48 В. Более высокое напряжение имеют мотор-генераторы гибридных автомобилей и электромобилей (от 200 В до 1000 В).

Ротор генератора чаще всего размещен внутри неподвижной части (статора), обращенная конструкция (внешний ротор) характерна для мотоциклетных генераторов. Обычно ротор имеет клювообразное исполнение, позволяющее создать многополюсную магнитную систему с помощью одной сосредоточенной обмотки (обмотки возбуждения).

Ротор с распределенной и короткозамкнутой обмотками характерен для стартер-генераторов, а безобмоточный ротор – для бесщеточных генераторов.

Основная доля генераторов современных автомобилей – это генераторы с контактными кольцами, позволяющие изменять силу тока в обмотке возбуждения, а, следовательно, поддерживать напряжение бортовой сети в заданных пределах.

На статоре генератора размещена одна (иногда две) многофазная распределенная обмотка, предназначенная для создания переменного тока. Выпрямительные диоды большинства генераторов соединены по схеме А. Н. Ларионова, представляющей собой мостовую трехфазную схему. Диоды повышения мощности использовались только на генераторах с обмотками, соединенными по схеме «звезда» для выпрямления третьей гармоники. Дополнительный выпрямитель также не используется в новых разработках, поскольку его функции возложены на многофункциональные регуляторы напряжения. Использование для коммутации тока полевых транзисторов позволяет снизить величину падения напряжения и общие потери энергии в выпрямительном блоке. Тиристоры используются для выпрямления только в мотоциклетных генераторах, что обусловлено необходимостью управляемого выпрямления (регулирования).

По способу охлаждения генераторы делятся на генераторы воздушного и жидкостного охлаждения. Жидкостное охлаждение используется на генераторах большой мощности легковых автомобилей премиум-класса. Воздушное охлаждение классических генераторов обеспечивается одним центробежным вентилятором (крыльчаткой), а компактных – двумя центробежными вентиляторами.

Регуляторы напряжения современных генераторов, как правило, конструктивно объединены со щёткодержателем. Обычные регуляторы напряжения, массово применявшиеся на автомобилях, вытесняются

многофункциональными, в том числе управляемыми электронным блоком управления двигателем посредством шин передачи данных (например, LIN).

Для привода генератора во вращение используется ременная передача, причем на генераторах классической конструкции, чаще всего, используются одно- и двухручьевые шкивы, а компактные генераторы оборудуют поликлиновыми шкивами. Часть генераторов оборудуют обгонной муфтой шкива, способствующей сведению к минимуму нежелательных воздействий неравномерности вращения коленчатого вала. Прямой привод и привод зубчатым ремнем может использоваться для стартер-генераторов.

Таким образом, в качестве объекта исследования принимаем синхронный вентильный генератор компактной конструкции с клювообразным ротором, имеющий трехфазную обмотку и выпрямительный блок, собранный на полупроводниковых диодах. Такими генераторами оснащается около 90% серийно выпускаемых легковых автомобилей отечественного и зарубежного производства, они устанавливаются на автобусы и грузовые автомобили.

§3 Конструктивное исполнение генератора с клювообразными полюсами

Рассмотрим конструкцию синхронного вентильный генератор компактной конструкции с клювообразным ротором (рисунок 1.10).

На рисунке 1.10 показано устройство генератора в разрезе, на котором цифрами обозначены: 1 – шкив генератора; 2 – передний подшипник; 3 – передняя крышка; 4 – крыльчатка; 5 – статор; 6 – стальная втулка; 7 – задняя крышка; 8 – щеткодержатель, объединенный с регулятором напряжения; 9 – задний подшипник; 10 – контактные кольца; 11 – выпрямительный блок; 12 – крепёжная лапа; 13 – вал ротора; 14 – клювообразный ротор; 15 – обмотка ротора; 16 – обмотка статора.

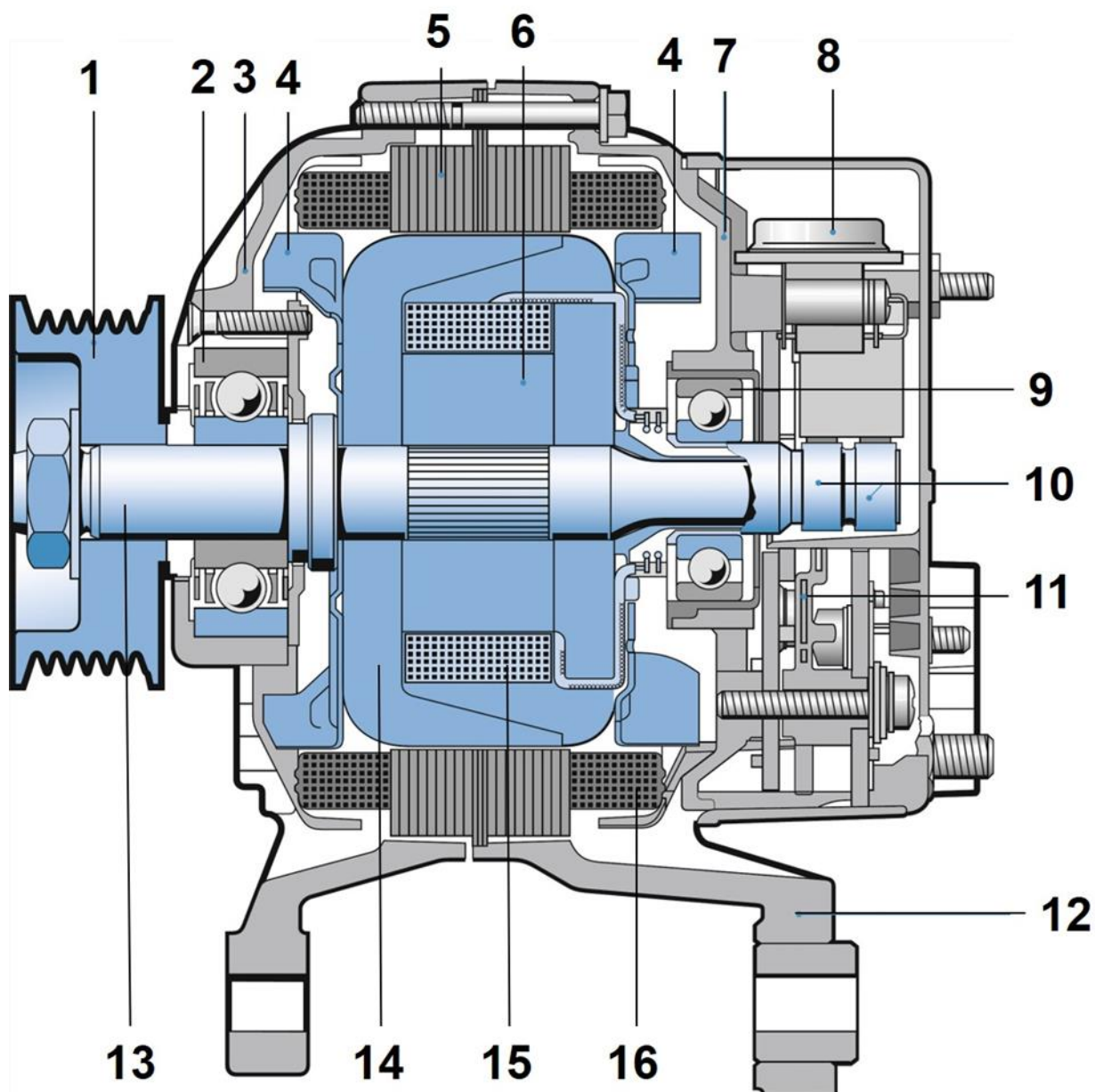
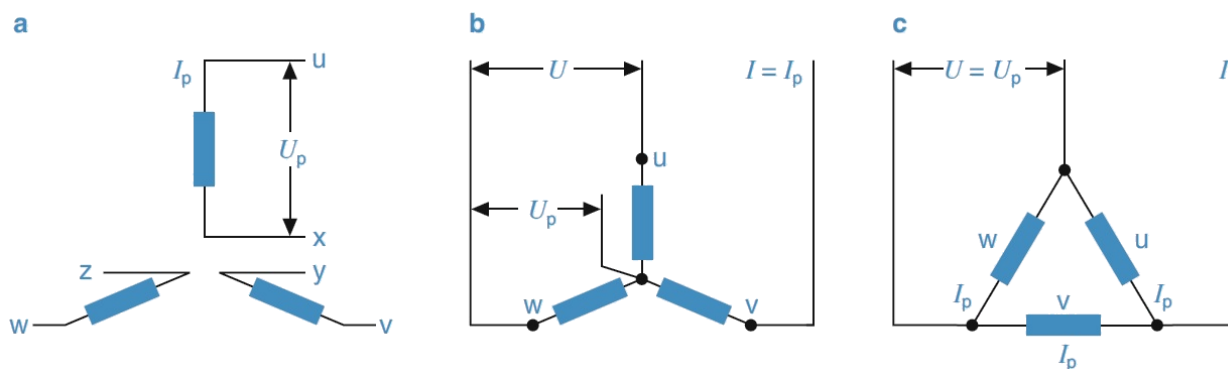


Рисунок 1.10 – Конструкция компактного генератора

Статор генератора набирается из отдельных листов изотропной электротехнической стали толщиной 0,8-1,0 мм, изолированных друг от друга лаком или оксидированием для снижения потерь на перемагничивание. Статор имеет 36, 48 или 72 паза, в которые укладывается обмотка статора, выполненная из эмалированного медного провода диаметром 1,0-2,0 мм. Пазы изолированы плёночной изоляцией (полиэтилентерефталат) или напылением эпоксидного компаунда. Обмотка закрепляется в пазе клином из изоляционного материала.

В трёхфазном генераторе в статоре находятся три одинаковых обмотки, которые расположены в пространстве смещёнными на 120° по отношению друг к другу. Вследствие смещения обмоток в пространстве на 120° синусоидальные переменные напряжения, произведённые в них, в каждом случае сдвинуты по фазе друг к другу на 120° (смещены по времени). Получаемый в результате переменный ток называется трёхфазным током. Фазы могут быть соединены звездой, треугольником или двойной звездой.

В соединении фаз звездой все обмотки одним выводом соединены в средней точке. Такое соединение обладает хорошими выходными характеристиками при низких оборотах автомобильного двигателя. Соединение фаз треугольником выполнено по схеме «конец-в-конец», то есть, конец одной обмотки соединён с началом другой. Это соединение имеет высокие нагрузочные характеристики.



а – не соединённая обмотка; б – соединение в звезду; с – соединение треугольником.

Рисунок 1.11 – Способы соединения трёх обмоток генератора

Схема распределенной волновой обмотки статора приведена на рисунке 1.12. Обмотка названа волновой, поскольку ее лобовые соединения расположены поочередно то с одной, то с другой стороны статора, напоминая волну.

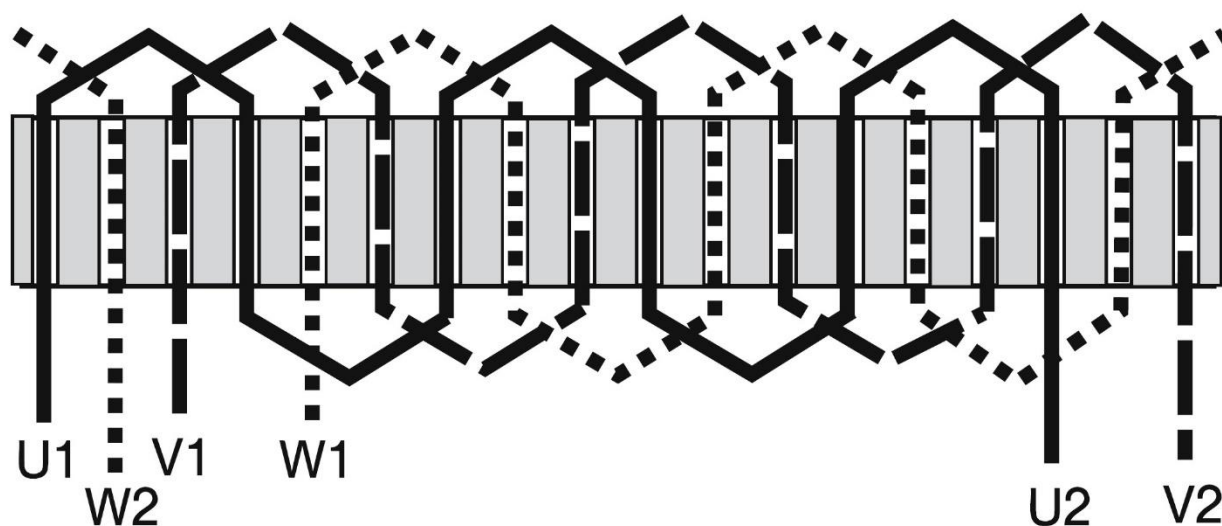


Рисунок 1.12 – Схема распределенной волновой обмотки статора

В основе названия «генератор с клювообразным ротором» лежит ротор: он состоит из двух противоположно поляризованных половин индуктора, чьи клювообразные полюса взаимно как южный и северный полюса входят в зацепление друг с другом (рисунок 1.13).

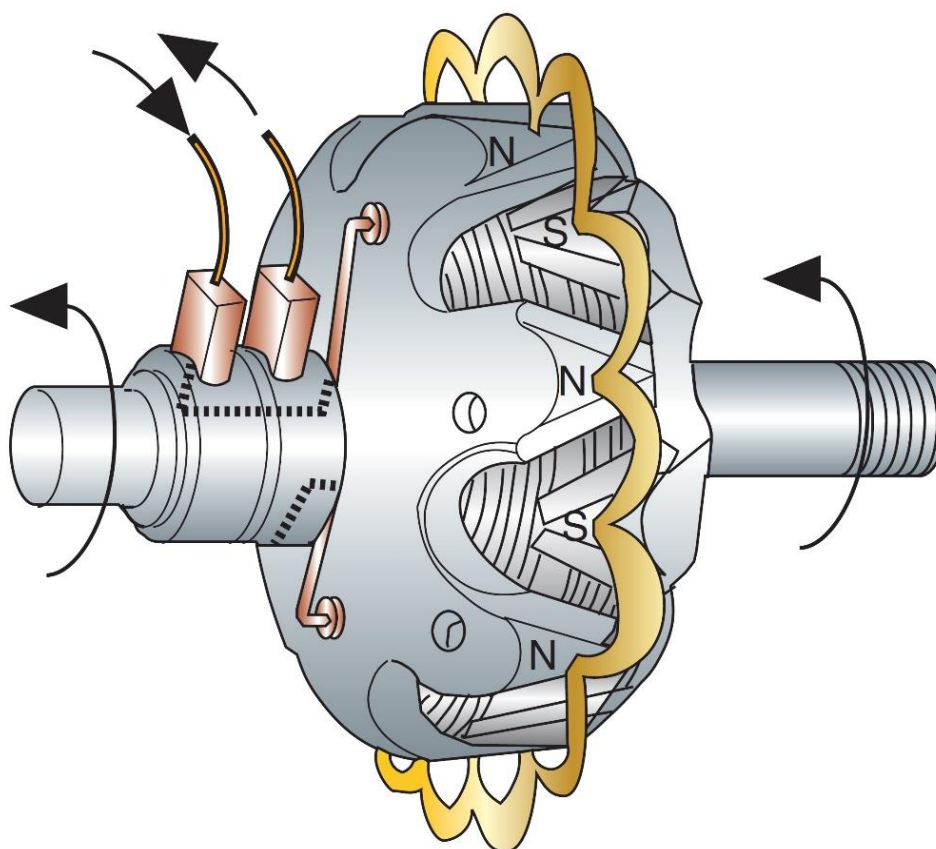


Рисунок 1.13 – Образование магнитного потока в роторе генератора

Фактическое число полюсов ограничено. Небольшое число полюсов приводит к незначительному использованию машины, в то время как высокое число полюсов значительно повышает потери магнитного потока рассеяния. Поэтому генераторы в зависимости от мощности бывают 12-полюсными и 16-полюсными.

Обмотка возбуждения в сборе с ротором пропитывается лаком. Ключи полюсов по краям обычно имеют скосы с одной или двух сторон для уменьшения магнитного шума генератора.

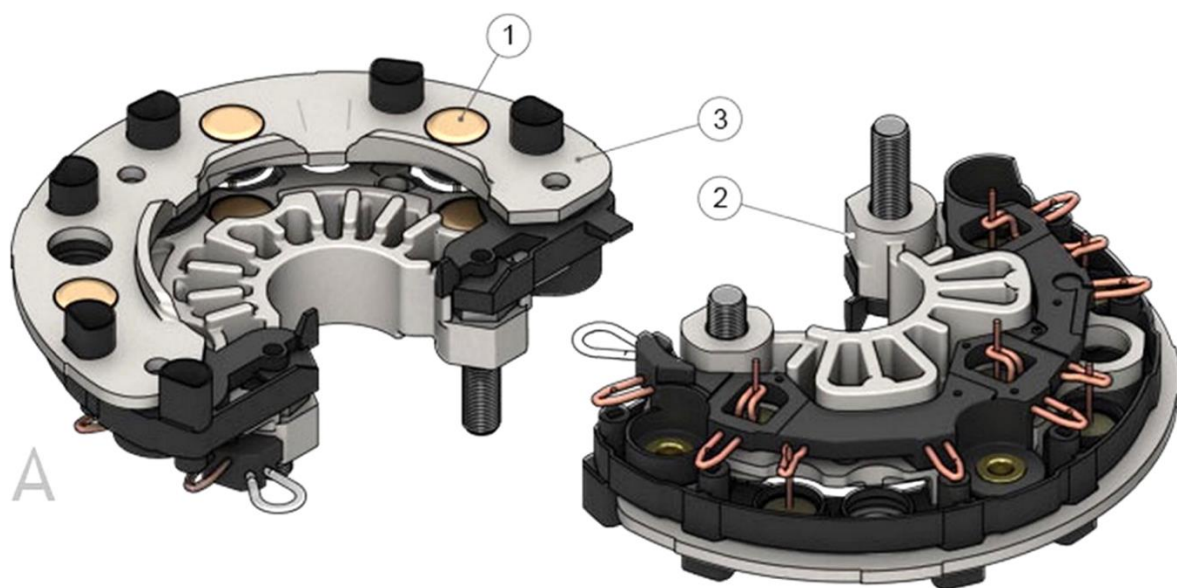
У генераторов смешанного магнитно-электромагнитного возбуждения между ключами располагаются постоянные магниты, намагниченные в направлении, перпендикулярном оси генератора таким образом, что северный полюс магнита примыкает к северному полюсу (ключу) ротора, а южный – к южному полюсу.

После сборки производится динамическая балансировка ротора, которая осуществляется высверливанием излишка материала у полюсных половин. Балансировка роторов генераторов компактной конструкции производится в сборе их с вентиляторами.

На валу ротора располагаются также контактные кольца, выполняемые чаще всего из меди с опрессовкой их пластмассой. К кольцам припаиваются или привариваются выводы обмотки возбуждения. Иногда кольца выполняются из латуни или нержавеющей стали, что снижает их износ и окисление, особенно при работе во влажной среде.

Диодный выпрямительный блок на трёх параллельных полумостах на шести полупроводниковых диодах (по схеме советского учёного-электротехника Ларионова Андрея Николаевича) преобразует переменный трёхфазный ток статора в постоянный ток (вернее, в однонаправленный пульсирующий) на выходе генератора. Выпрямительные диоды генератора играют роль одностороннего вентиля (отсюда название – вентильный генератор), пропускающего ток только в одном направлении, тем самым

блокируя протекание электрического тока из бортовой сети автомобиля к обмоткам статора.



1 – диоды генератора; 2 – положительный теплоотвод; 3 – отрицательный теплоотвод

Рисунок 1.14 – Конструкция выпрямительного блока

Выпрямительный блок представляет собой две металлические пластины-теплоотвода, в которые запрессовывают диоды таблеточного типа разной полярности (по три в каждую). Три малых диода выполняют вспомогательную функцию. Рифлёный металлический корпус положительных диодов выполнен как катод, а корпус отрицательных диодов – как анод. Положительные диоды запрессованы в положительный теплоотвод, который соединен с выводом В+. Металлический корпус отрицательного диода, запрессованного в отрицательный теплоотвод, соединен с «массой».

Проволочные выводы диодов присоединены к концам обмотки статора. В качестве силовых диодов на сегодняшний день главным образом используются диоды Зенера (стабилитроны, Z-диоды). Они ограничивают скачки напряжения, возникающие в генераторе при сильном изменении нагрузки (защита при резком сбросе нагрузки на генератор).

Трёхфазный генератор обычно не имеет защиты от неправильной полярности. Неправильная полярность батареи (например, смешивание полюсов батареи при облегчении пуска с использованием внешней батареи) может привести к повреждению диодов в генераторе

Включение выпрямительных блоков в схему генератора осуществляется распайкой или сваркой выводов фаз на специальных монтажных площадках выпрямителя или винтами.

Конструкция всех щёточных узлов принципиально одинаковая. Основу узла составляет пластиковый корпус с двумя параллельными каналами, в которых находятся щётки с прижимными пружинами. Щётки гибкими медными проводниками (плетёными тросиками или просто многожильными проводами) соединены с электрическими контактами, выполненными на обратной стороне щёткодержателя.

Щётки имеют форму стержней прямоугольного сечения, такая форма обеспечивает наилучший контакт щёток с контактными кольцами. Щётки прижимаются к кольцам пружинами, новые щётки постепенно прирабатываются, их торцы приобретают полукруглую форму, чем обеспечивается наилучший контакт с контактными кольцами.

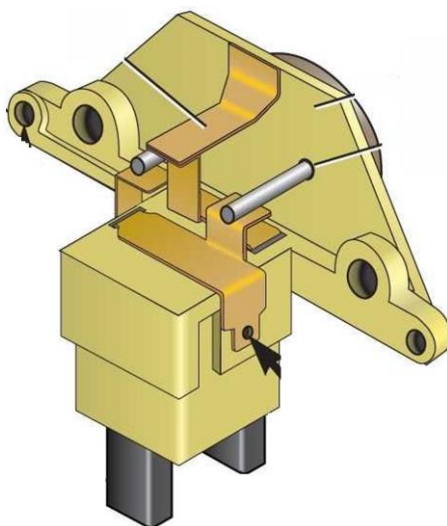


Рисунок 1.15 – Конструкция щёткодержателя

В автомобильных генераторах применяются щётки двух типов – меднографитные и электрографитные. Последние имеют повышенное

падение напряжения в контакте с кольцом по сравнению с меднографитными, что неблагоприятно сказывается на выходных характеристиках генератора, однако они обеспечивают значительно меньший износ контактных колец.

Подшипниковые узлы генераторов – это, как правило, радиальные шариковые подшипники с одноразовой закладкой пластичной смазки на весь срок службы и одно или двухсторонними уплотнениями, встроенными в подшипник. Посадка шариковых подшипников на вал со стороны контактных колец обычно плотная, со стороны привода – скользящая, в посадочное место крышки наоборот – со стороны контактных колец – скользящая, со стороны привода – плотная.

Так как наружная обойма подшипника со стороны контактных колец имеет возможность проворачиваться в посадочном месте крышки, то подшипник и крышка могут вскоре выйти из строя, возникнет задевание ротора за статор. Для предотвращения проворачивания подшипника в посадочное место крышки помещают различные устройства – резиновые кольца, пластмассовые стаканчики, гофрированные стальные пружины и т. п.

Привод генератора осуществляется клиновым (поликлиновым) ремнём через шкив, установленный на валу ротора. Поликлиновый ремень обладает рядом преимуществ перед клиновым. Он более узкий, соответственно, благодаря большей гибкости может работать на шкивах меньшего диаметра. Немаловажно и то, что поликлиновый ремень в работе может изгибаться в обоих направлениях, а клиновый, из-за своей жёсткости, только в одном. Все это даёт возможность поликлиновому ремню осуществлять вращение одновременно нескольких агрегатов, также у него более высокий, по сравнению с клиновым, КПД.

Качество обеспечения питанием потребителей электроэнергии, в том числе, заряда аккумуляторной батареи зависит от передаточного числа ремённой передачи, равного отношению диаметров ручьёв приводного

шкива генератора к шкиву коленчатого вала. Для повышения качества питания электропотребителей это число должно быть как можно больше, так как при этом частота вращения генератора повышается, и он способен отдать потребителям больший ток. Однако при слишком больших передаточных числах происходит ускоренный износ приводного ремня, поэтому передаточные числа передачи двигатель-генератор для клиновых ремней лежат в пределах 1,8-2,5, для поликлиновых до 3.

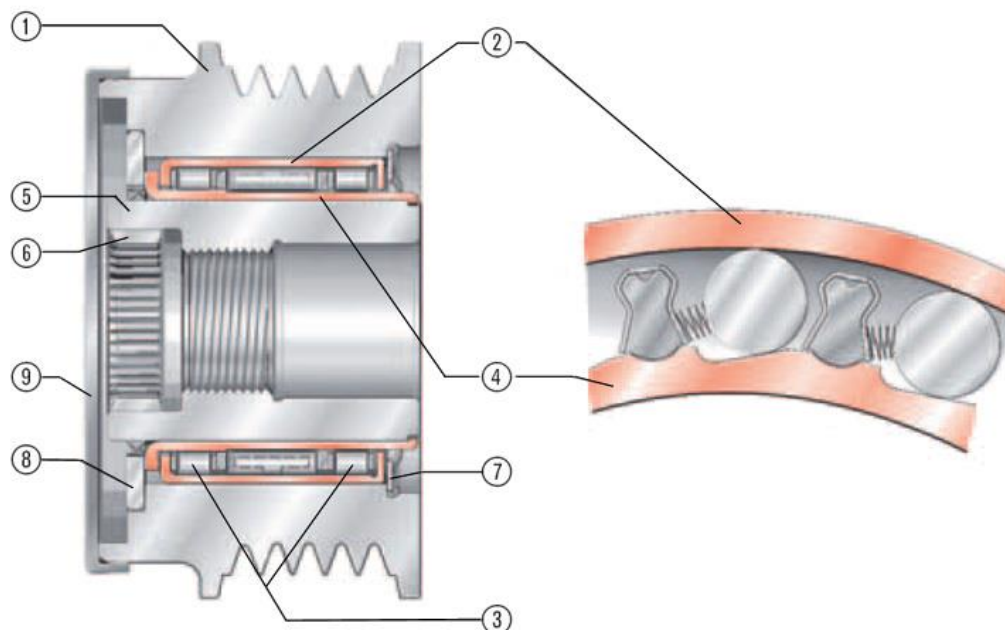
Обгонная муфта шкива генератора предназначена для сведения к минимуму нежелательных воздействий неравномерности вращения коленчатого вала.

У муфты две обоймы: наружная связана со шкивом, внутренняя – с валом ротора генератора. Между обоймами расположено несколько рядов роликов. Одни исполняют роль игольчатых подшипников, другие, перекатывающиеся по профилированной части поверхности внутренней обоймы – роль стопорного устройства.

Когда в моменты сгорания в цилиндрах шкив разгоняет ротор генератора, стопорные ролики, перекатившись к вершинам выступов, «замыкают» наружную и внутреннюю обоймы муфты между собой, крутящий момент передается на ротор.

Но если сгорания нет и в цилиндрах происходит сжатие, притормаживающее вращение коленчатого вала, внутренняя обойма муфты начинает обгонять наружную, ролики перемещаются во впадины рабочей поверхности внутренней обоймы, обоймы разъединяются. Шкив и ротор при этом вращаются независимо друг от друга, чем исключается негативное влияние инерции якоря на ремень генератора.

Шкив генератора с обгонной муфтой (*англ. – OAP (overrunning alternator pulley)*) оснащён комбинацией из прецизионных роликоподшипников и подпружиненных игольчатых подшипников, что обеспечивает надёжную работу в режиме свободного хода и в режиме блокировки.

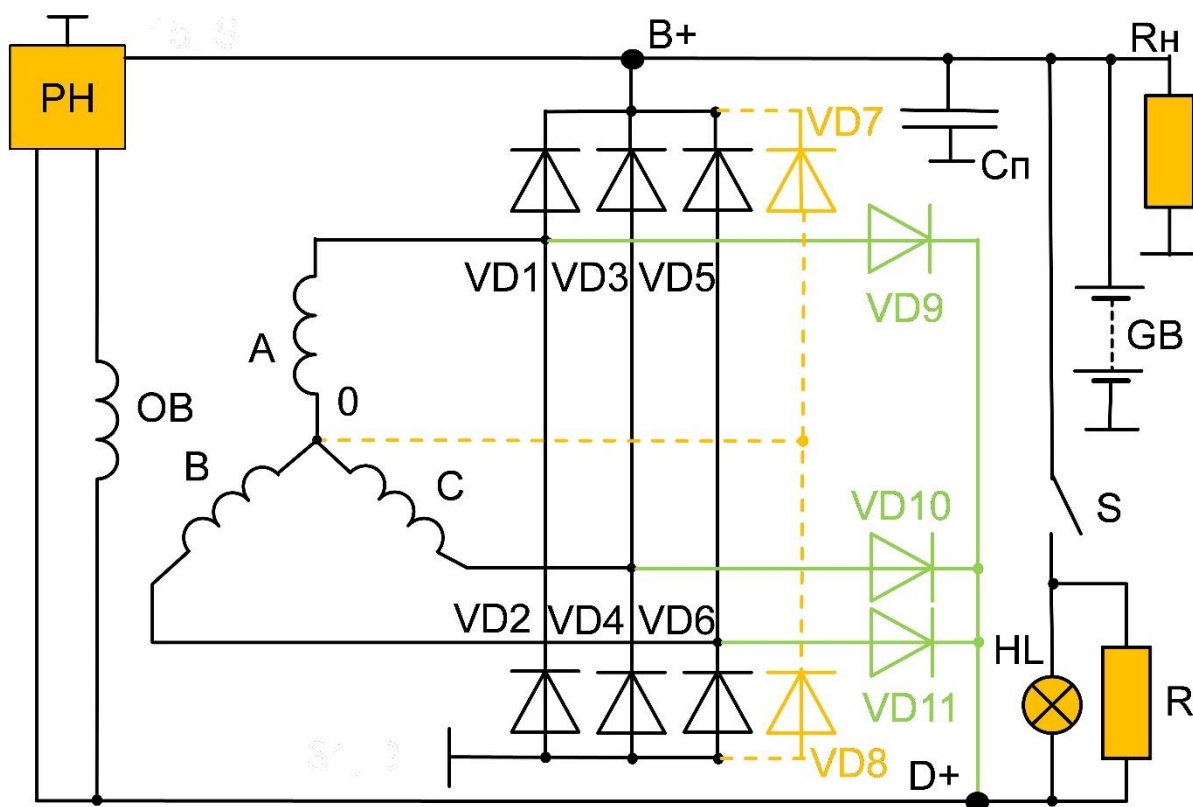


1 – ремённый шкив; 2 – наружная обойма обгонной муфты; 3 – интегрированный радиальный роликовый подшипник поддержки; 4 – внутренняя втулка с профилем наклонных плоскостей; 5 – внутренняя втулка; 6 – шлицевой профиль; 7 – прокладка из эластомера; 8 – контактная пластина с сальником; 9 – пластиковая крышка

Рисунок 1.16 – Обгонная муфта шкива генератора

Электрическая схема генератора представляет собой последовательное/параллельное соединение его элементов с указанием обозначения выводов. На рисунке 1.17 приведена схема генератора при соединении фаз статора звездой.

Основными элементами электрической схемы являются: VD1-VD6 – основной выпрямитель, предназначенный для преобразования переменного тока в ток одного направления; VD7-VD8 – диоды повышения мощности, служащие для выпрямления третьей гармоники переменного напряжения; VD9-VD11 – дополнительный выпрямитель, препятствующий разряду аккумуляторной батареи при включённом зажигании и неработающем двигателе внутреннего сгорания.



A, B, C – фазы обмотки статора, Cп – помехоподавительный конденсатор, GB – аккумуляторная батарея, HL – контрольная лампа, R – добавочное сопротивление, Rн – сопротивление нагрузки (потребители), S – выключатель зажигания, VD1 – VD11 – выпрямительные диоды, 0 – общая (нулевая) точка фаз обмотки статора, OB – обмотка возбуждения (ротора), PH – регулятор напряжения.

Рисунок 1.17 – Электрическая схема генератора при соединении обмоток звездой

Помимо диодов в электрическую схему также входят: **C** – помехоподавительный конденсатор, уменьшающий помехи работе электронных устройств автомобиля, возникающие при искрении щёток генератора; **HL** – контрольная лампа, выполняющая диагностические функции. При включении выключателя зажигания **S** ток от аккумуляторной батареи **GB** протекает через контрольную лампу и через обмотку возбуждения генератора, обеспечивая его возбуждение. Лампа горит, свидетельствуя об исправности генератора. После запуска ДВС напряжение

генератора возрастает (в том числе и на выводе **D+**), при этом контрольная лампа гаснет, поскольку разность потенциалов на ее выводах становится близкой к нулю.

Это означает, что генератор исправен и вырабатывает напряжение. Параллельно контрольной лампе включается резистор **R**, обеспечивающий возбуждение генератора при перегорании контрольной лампы.

§4 Выводы по главе

В развитии конструкции генераторов транспортных средств принято выделять несколько основных этапов: замену генераторов постоянного тока более совершенными генераторами переменного тока; объединение регулятора напряжения со щеткодержателем; внедрение генераторов компактной конструкции; применение multifunctional регуляторов напряжения и передачу функции управления генератором электронному блоку управления двигателем.

Разработанная классификация генераторов транспортных средств позволила обосновать выбор в качестве объекта исследования синхронного вентильного генератора компактной конструкции, имеющего трёхфазную обмотку и выпрямительный блок, собранный на полупроводниковых диодах, объясняется массовостью использования на транспорте (около 80% серийно выпускаемых легковых автомобилей отечественного и зарубежного производства).

Анализ конструкции компактного генератора показал, что не все его элементы обладают одинаковой надежностью и можно предположить, что дефекты эксплуатации будут обусловлены недостаточной защищенностью генератора от воздействий окружающей среды.

Глава 2 Характеристика условий эксплуатации автомобильных генераторов

Все факторы, влияющие на состояние автомобильных генераторов, можно разделить на две группы: внешние, обусловленные воздействием окружающей среды и условий работы, и внутренние, определяемые процессами износа и старения деталей генератора.

Под старением подразумевают естественный процесс постепенного изменения физических и химических свойств материалов. Износ обусловлен, в основном, трением, а также действием электрического тока и напряжения.

Внешние факторы можно разделить на: климатические, эксплуатационные и производственные, к которым относятся ошибки конструирования и нарушения технологии производства.

Ошибки конструирования, связанные с неправильным выбором материалов, комплектующих изделий и нарушения технологии производства составляют примерно 14 – 18% отказов [33] в процессе эксплуатации.

§1 Климатические факторы эксплуатации автомобильных генераторов

Природно-климатические условия эксплуатации автомобилей характеризуются температурным режимом окружающего воздуха, атмосферным давлением, скоростью ветра, влажностью воздуха и некоторыми другими факторами.

Автомобильные генераторы работают в тяжелых условиях, так как расположены на расстоянии около 200 мм от проезжей части. Загрязнения,

вода с химически активными веществами, соль, песок в осенне-зимнее и пыль в летнее время захватываются вентиляторами генератора и оседают вместе с продуктами износа щётчного узла на обмотках, изоляторах, проводах.

Климатические факторы оказывают негативное воздействие на генераторы не только в период их пуска и работы, но и в периоды хранения. При хранении генераторов под действием климатических факторов развиваются деградиционные процессы, которые в процессе работы генераторов по назначению ускоряют возникновение отказов.

Исследованию влияния климатических факторов на работоспособность автомобилей и их агрегатов посвящены работы Бакуревича Ю.Л., Захарова Н.С., Коха П.И., Кричевского Ю.И., Лабезникова М.Г., Левина А.Ф., Лосавио Г.С., Резника Л.Г., Сапоженкова Н.О., Семенова Н.В., Шелякина А.С., Эль-Сагира М. и других.

Классификация климатических факторов, приведенная в работах [31, 53, 55] представлена на рисунках 2.1, 2.2 и 2.3.



Рисунок 2.1 – Классификация климатических факторов [31]¹⁾

¹⁾ Здесь и далее изображения оцифрованы с сохранением фактических данных и ссылки на первоисточник (Прим. автора)

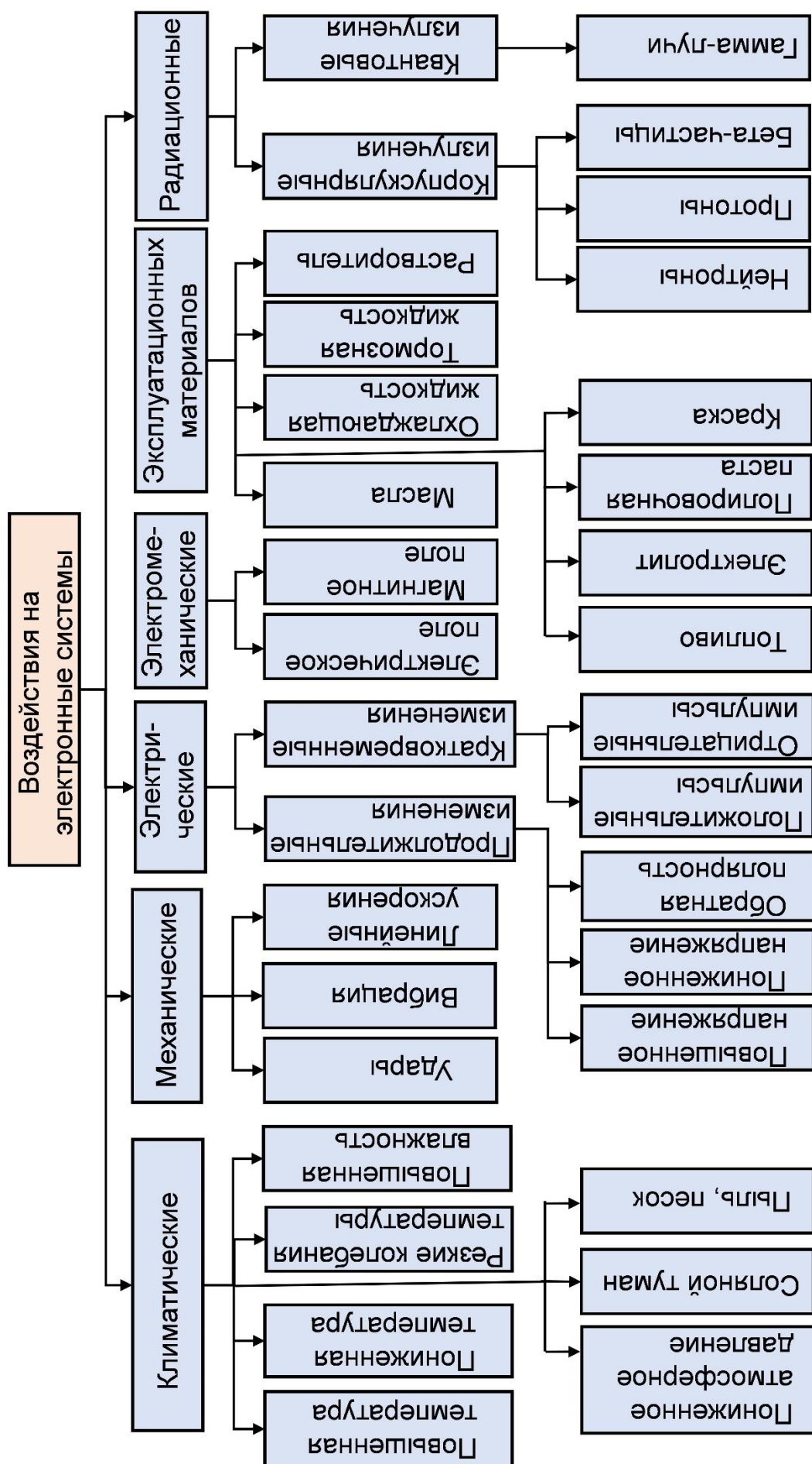


Рисунок 2.2 – Условия работы системы электроснабжения [55]

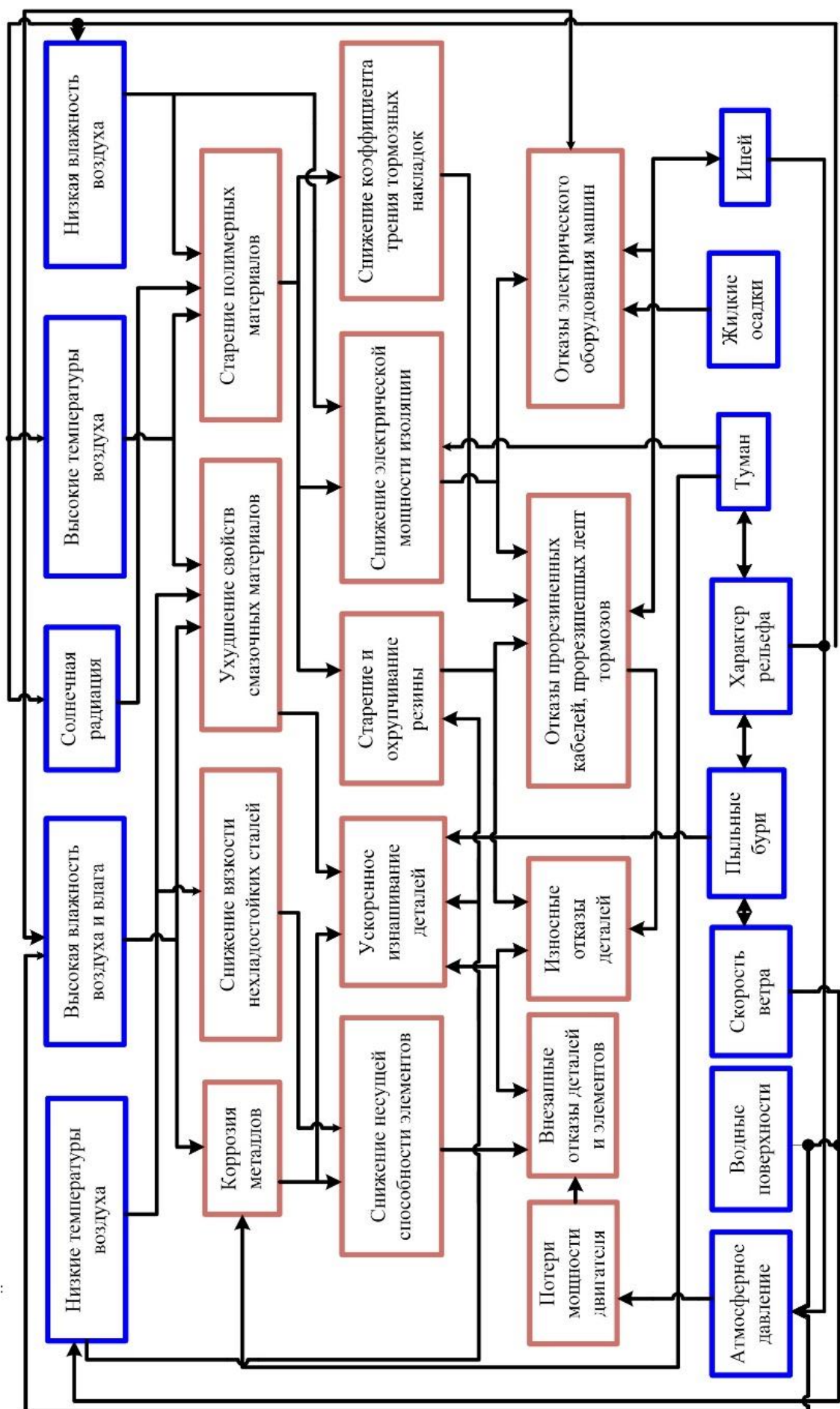


Рисунок 2.3 – Схема комплексного влияния основных климатических факторов и атмосферных явлений на свойство материалов и надежность машин [53]

Наиболее исчерпывающая классификация факторов, оказывающих влияние на работу системы электроснабжения и генератора, в частности, приведена на рисунке 2.2, однако некоторые из них (например, радиационные) не характерны для штатной эксплуатации транспортных средств.

Схема комплексного влияния факторов, представленная на рисунке 2.3, является общей для всех агрегатов дорожных и строительных машин и некоторые виды отказов (например, снижение вязкости не хладостойких сталей) не имеют отношения к генераторам.

Рассмотрим более подробно основные факторы погодноклиматических условий.

§2 Влияние температура окружающего воздуха

Температурные дестабилизирующие факторы проявляются в процессе эксплуатации в виде постоянно действующих высоких или низких температур, плавно или резко изменяющихся от положительных до отрицательных и наоборот, например, при запуске двигателя в холодное время года.

Системы электроснабжения должны быть работоспособны в температурных условиях подкапотного пространства, где температура может достигать 120 °С – 140 °С, а возможная отрицательная температура минус 60 °С, при этом не исключены температурные удары, например, при попадании струи холодной воды при мойке двигателя автомобиля [55].

Высокие температуры вызывают уменьшение вязкости смазочного материала, потерю упругости, изменение объема и старение материала деталей. Эти физические процессы приводят к конструкционным отказам, связанным с разрывами, деформациями, поломками, заеданиями и заклиниванием. В деталях автомобильных генераторов повышение

температуры вызывает изменение электропроводимости, диэлектрических свойств, диффузию и электродиффузию, и химические реакции в материалах. В результате возникают нестабильность и ухудшение электрических параметров, тепловая неустойчивость и тепловой пробой диэлектриков, р—п переходов и конденсаторов.

Высокие температуры вызывают «старение» (ослабление сопротивляемости) изоляционного материала, происходящее из-за ускорения химических процессов разложения. В результате утрачиваются изолирующие свойства и возникает пробой изоляции. Установлено, что увеличение температуры всего на 10 °С – 15 °С вызывает уменьшение срока службы изоляции вдвое [9, 24, 52] (*правило Монтзингера*).

$$T = T_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{k \cdot (v - v_0)} \quad (2.1)$$

где T_0 – расчётный срок службы изоляции, ч;

k – коэффициент пропорциональности;

v – температура изоляции, при которой генератор работает в данный момент, °С;

v_0 – номинальная температура работы изоляции, °С.

Выпрямители на полупроводниковых диодах обладают достаточно высокой надёжностью только в допустимых пределах температур окружающей среды. Например, для кремниевых диодов температурный диапазон составляет от – 60 °С до + 125 °С.

Ухудшение условий теплопроводности, рост потерь в обмотках из-за увеличения сопротивления, увеличение потерь на трение из-за температурного расширения деталей подшипников и другие факторы вызывают снижение мощности электромашин при нагреве [23].

Заметное изменение интенсивности отказов начинается с температур, превышающих 60 °С. Хотя подобная температура окружающего воздуха маловероятна, следует учитывать, что в закрытой, недостаточно вентилируемой машине (подкапотном пространстве) может быть достигнута значительно большая температура. На рисунке 2.4 показано, как изменилась температура подкапотного пространства и выпрямителя генератора за последние 40 лет [Bradfield, M. «Thermal Design Challenges in Automotive Alternator Power Electronics». Electronics Cooling. <http://www.electronicscooling.com/2002/05/thermal-design-challenges-in-automotivealternatorpower-electronics>].

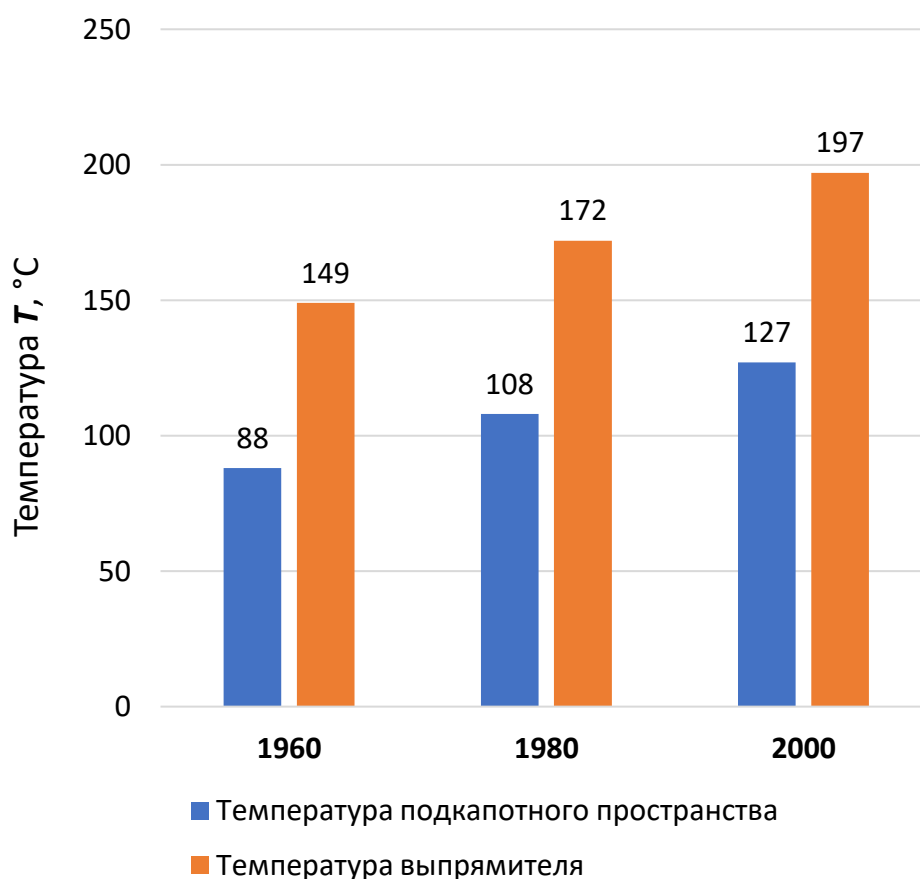


Рисунок 2.4 – Динамика температуры подкапотного пространства и выпрямителя генератора [Bradfield, M.]

Опасны для деталей автомобильных генераторов резкие колебания температуры окружающей среды из-за применения в конструкциях сопряжений деталей из материалов с различными температурными

коэффициентами линейного расширения (ТКЛР). При изменении температуры в сопряженных деталях возникают механические напряжения, которые приводят к частичному или полному разрушению материала, имеющему меньшую прочность, например, полимерных составляющих изоляции обмоток генератора.

У полупроводниковых приборов возникают перемежающиеся отказы, связанные с механическими повреждениями в местах соединения кремния и окиси кремния, кремния и металла, металла и стекла и т. п. Многократно повторяющиеся циклы резких перепадов температур могут привести к растрескиванию и расслоению печатных плат, усталостному разрушению припойных соединений, разгерметизации уплотнений, увеличению механических напряжений.

Низкие температуры приводят к обледенению деталей, увеличению вязкости смазочного материала, к изменению объема деталей и старению материалов, что способствует появлению конструктивных дефектов в виде поломок, заеданий, деформаций и заклинивания.

Для автомобилей, работающих на открытом воздухе, значения низких температур находятся в пределах от 0 °С до минус 40 °С, а в северных районах охлаждение материалов может достигать минус 60 °С. У многих конструкционных сталей и пластмасс порог хладноломкости лежит в диапазоне этих температур [31].

Рост числа отказов при низких температурах вызван в первую очередь застыванием смазочных материалов. Кроме того, в зимний период отмечается большое число пробоев изоляции обмоток статора, что вызвано увлажнением изоляции из-за попадания внутрь генераторов снега и конденсации влаги.

При низких температурах мощность электрических машин повышается, однако значительное число отказов в зимнее время вызвано большими нагрузками в момент пуска двигателя, так как сопровождается резким повышением силы тока.

Интенсивность изнашивания агрегатов автомобиля и, как следствие, общее количество отказов, отнесённых к пробегу (рисунок 2.5), в зависимости от средней температуры окружающего воздуха изменяются по кривой, имеющей минимум, соответствующий оптимальной температуре окружающего воздуха. Соответственно и для каждого агрегата существует оптимальный тепловой режим.

Наименьшее количество отказов конструктивных элементов автомобилей происходит при $t_{ов}$, лежащей в интервале от минус 5 °С до 15 °С [44].

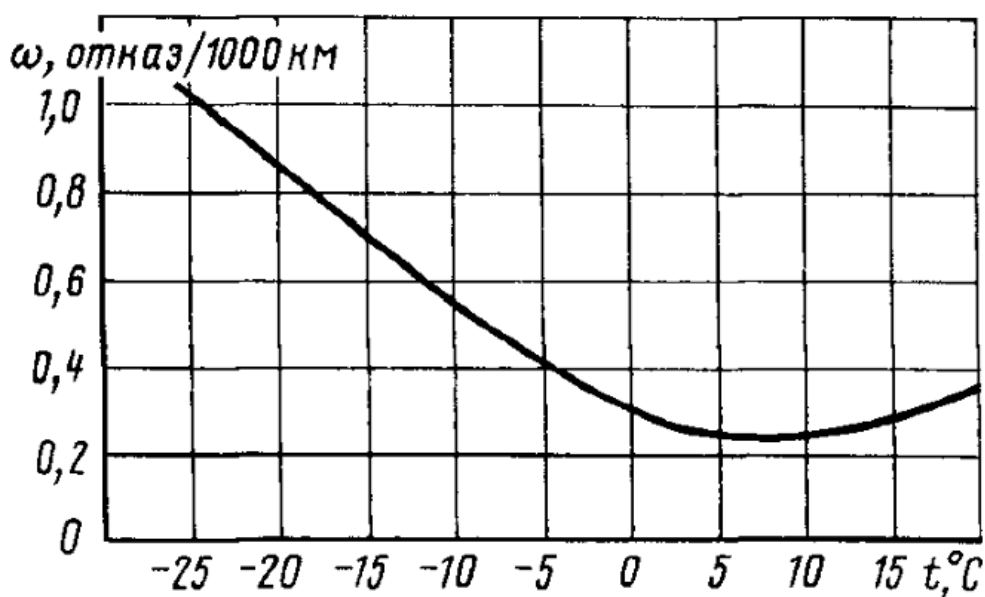


Рисунок 2.5 – Влияние температуры окружающего воздуха на изменение общего числа отказов автомобилей (по данным НИИАТ) [44]

§3 Влияние относительной влажности воздуха

Существенное влияние на показатели надёжности генераторов оказывает влажность окружающей среды. Воздействие относительной влажности воздуха на автомобильные генераторы обуславливается процентным содержанием влаги в воздухе. При повышенной влажности молекулы воды проникают внутрь материала.

Скорость проникновения влаги в материал увеличивается при повышении температуры окружающего воздуха. Длительное воздействие высокой влажности вызывает изменение свойств изоляционных материалов [9, 22].

Высокая влажность и ее изменение способствуют появлению конденсата, росы, эмульгированию смазочного материала и вызывают коррозию металлов. Поглощение влаги диэлектриком ведет к уменьшению его сопротивления, ухудшению диэлектрических свойств, набуханию, механическим повреждениям.

Интенсивное внутреннее увлажнение изоляции продолжается и в неработающих генераторах. В период остывания генератора давление в порах и капиллярах изоляции несколько ниже атмосферного. Влага проникает в мельчайшие поры и капилляры, что активизирует и ускоряет процессы старения и разрушения изоляции.

Увлажнение и загрязнение заметно снижают пробивное напряжение дефектных мест изоляции, поскольку оно увеличивает проводимость как самого дефектного места (трещин, порезов), так и участков между дефектными местами и заземленными частями.

При малом содержании влаги в воздухе (меньше 50%) в сухой теплой атмосфере перемещение молекул воды происходит из материала в воздух, что также изменяет свойства материалов. При низкой влажности материалы становятся хрупкими, ломкими, в них интенсивнее развиваются трещины и микроразрушения. Нормальной влажностью считается относительная влажность 60 – 75% при температуре 20 °С – 25 °С [33].

§4 Влияние атмосферного давления

Автомобильные генераторы, в большинстве своем, являются самовентилируемыми машинами, использующими для охлаждения

окружающий воздух. С ростом высоты над уровнем моря происходит снижение атмосферного давления, и охлаждающая способность таких машин уменьшается.

Для работы электрических машин на высотах над уровнем моря свыше 1000 до 4300 м среднее, верхнее и эффективное значения температур устанавливают по ГОСТ 15150-69 «Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды».

Для автомобильных генераторов номинальное значение высоты установлено 1000 м, и при эксплуатации на высоте свыше 1000 до 4300 м и температуре 40 °С мощность их снижают (таблица 2.1).

Несоблюдение этих условий приведет к перегреву автомобильных генераторов и преждевременному выходу их из строя.

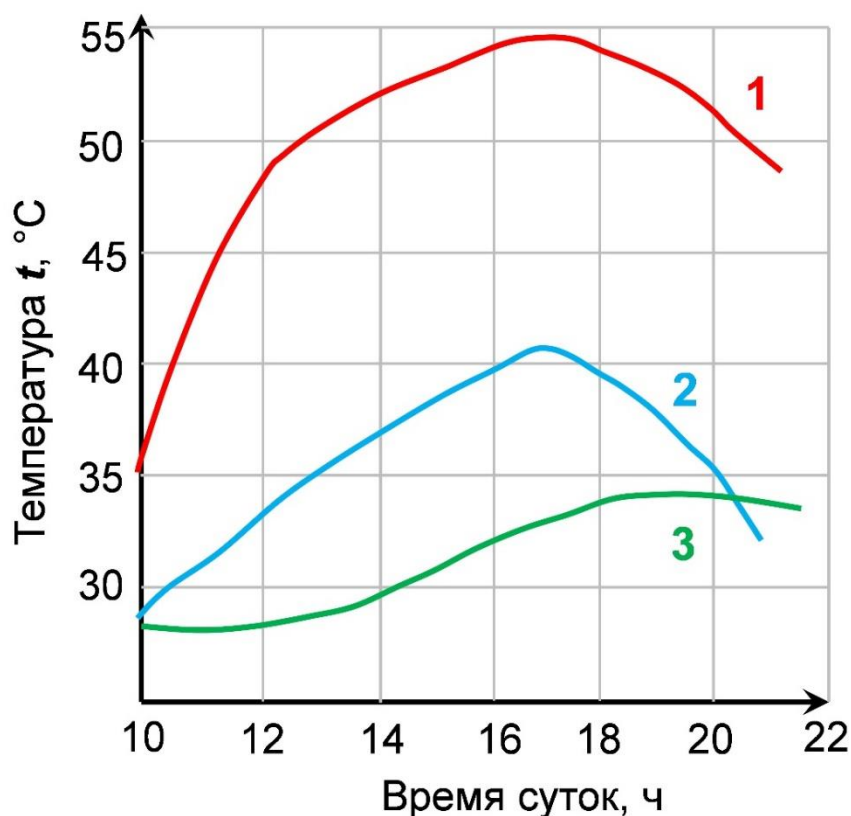
Таблица 2.1 – Номинальная мощность генератора при эксплуатации на высоте

Высота над уровнем моря, м	Номинальная мощность, %	Высота над уровнем моря, м	Номинальная мощность, %
1000	100	3000	88
1500	98	3500	84
2000	95	4000	80
2400	93	4300	74

§5 Влияние солнечной радиации

Величина солнечной радиации на территории страны достигает 1,51 кал/мин/см². В летнее время, поверхность машин и механизмов подвергается действию прямых солнечных лучей. Солнечный свет действует на материалы и в результате теплового эффекта, и вследствие содержания ультрафиолетовых лучей. Самое сильное действие на

материалы оказывают солнечные лучи, перпендикулярные к поверхности. В странах с умеренным климатом это наблюдается с марта по сентябрь месяц. Солнечная радиация существенно повышает температуру приземного слоя [26].



1 — температура электролита аккумуляторной батареи, освещенной солнцем; 2 — температура окружающего воздуха; 3 — температура электролита батареи, находящейся в тени

Рисунок 2.6 – Зависимость температуры электролита аккумуляторных батарей от солнечной радиации [26]

Установлено, что при температуре воздуха 50 °C наружные металлические части автомобилей, окрашенные в темный цвет, нагреваются до 70 °C [23], что способствует нагреву автомобильных генераторов.

Температура генераторов, установленных на автомобилях, зависит не только от температуры окружающего воздуха, но и от солнечной радиации. Так, температура обмоток генератора автомобиля, освещенного солнцем, на

18 °C – 20 °C выше, чем в генераторе автомобиля, установленного в тени, и на 15 °C выше температуры окружающего воздуха.

§6 Влияние ветра, пыли и других факторов

Ветер влияет на скорость охлаждения автомобильных генераторов. Например, при увеличении скорости ветра от 0 до 10 м/с темп охлаждения деталей увеличивается в 3 раза. По средним значениям температур и ветров для умеренного климатического района генератор зимой остывает до температуры окружающего воздуха за 25 – 30 мин, летом – за 3 – 4 часа [55].

Существенное влияние на температуру воздуха под капотом оказывает направление ветра. При попутном ветре температура воздуха под капотом резко повышается [26].

Опыт эксплуатации автомобилей показал, что запыленность воздуха оказывает значительное влияние на техническое состояние автомобилей.

Пыль является дисперсной системой, включающей частицы различных размеров и формы, обладающие свойством находиться во взвешенном состоянии. Обычно дорожная пыль включает в себя частицы размером до 80 – 100 мкм.

В среднем при движении автомобилей по асфальтовому шоссе содержание пыли в воздухе составляет в летних условиях примерно 15 мг/м³, а по сельским грунтовым дорогам – доходит до 6000 мг/м³. Следует иметь в виду, что видимость практически полностью теряется при содержании пыли в воздухе около 1500 мг/м³.

Наибольшее разрушающее воздействие на электрические машины оказывают мелкие частицы пыли диаметром до 15 мкм. Эти частицы проникают в пространство между движущимися частями, ограничивают их перемещение, увеличивают износ. Оседая на поверхности изоляции, пыль образует электропроводящие пути. Оседая на поверхности защитных

покрытий, пыль в сочетании с влагой ускоряет протекание химических реакций, которые разрушают покрытия [23].

Пыль засоряет вентиляционные пути электрических машин, покрывает обмотки и активную сталь теплоизолирующим слоем, что вызывает перегрев машин. Пыль загрязняет подшипники, вызывая перегрев их, контактные щетки и кольца, способствуя их износу. Смазка в подшипниках электрических машин при высоких температурах расходуется быстрее, чем в нормальных условиях [22].

Агрессивные пары и газы разрушают изоляцию и защитные покрытия посредством химических реакций на поверхности этих материалов. Влияние состава атмосферы на скорость протекания электрохимической коррозии может быть проиллюстрировано приведенными в таблице 2.2 данными об относительных величинах коррозии углеродистой стали.

Таблица 2.2 – Скорость коррозии стали в атмосфере с различным составом

Характер атмосферы	Относительная коррозия углеродистой стали, %
Индустриальная, сильно загрязненная	100
Индустриальная	65
Морская чистая	38
Сухая континентальная	1 – 9

Таким образом, длительная работа автомобильных генераторов в непрерывно изменяющихся в широких пределах климатических условиях связана с накоплением необратимых повреждений в материалах.

Под воздействием климатических факторов происходят процессы разупрочнения, снижения твердости и износостойкости материалов, которые приводят к микроповреждениям рабочих поверхностей деталей. Эти изменения, постепенно накапливаясь, способствуют нарушению нормальных режимов работы деталей, сборочных единиц и генераторов в

целом, что в конечном итоге приводит к уменьшению их надежности и увеличению количества и стоимости работ по техническому обслуживанию и ремонту.

Многие показатели климатических факторов взаимосвязаны (коррелированы) друг с другом. Учитывая наличие корреляционных связей между климатическими факторами, ограничимся рассмотрением основных независимых друг от друга факторов, оказывающих на работу автомобильных генераторов решающее значение.

Как следует из вышеприведенных данных, большинство климатических факторов прямо или косвенно оказывают влияние на температуру деталей автомобильных генераторов, поэтому основным климатическим фактором принимаем температуру окружающего воздуха.

§7 Воздействие эксплуатационных факторов

Обобщенная схема влияния климатических и эксплуатационных факторов приведена на рисунке 2.7.

Условия эксплуатации изделий электрооборудования автомобилей представляют собой совокупность внешних факторов (вибрационных и ударных нагрузок, агрессивных сред, внешнего электромагнитного поля, перенапряжения в бортовой сети и т. д.), качества дорог, условий движения транспорта и рельефа местности.

Различают пять категорий эксплуатации в зависимости от сочетания качества дорог, условий движения и рельефа местности [33].

Категории условий эксплуатации непосредственно влияют на периодичность и трудоёмкость технического обслуживания автотранспорта, а, следовательно, и электрооборудования.

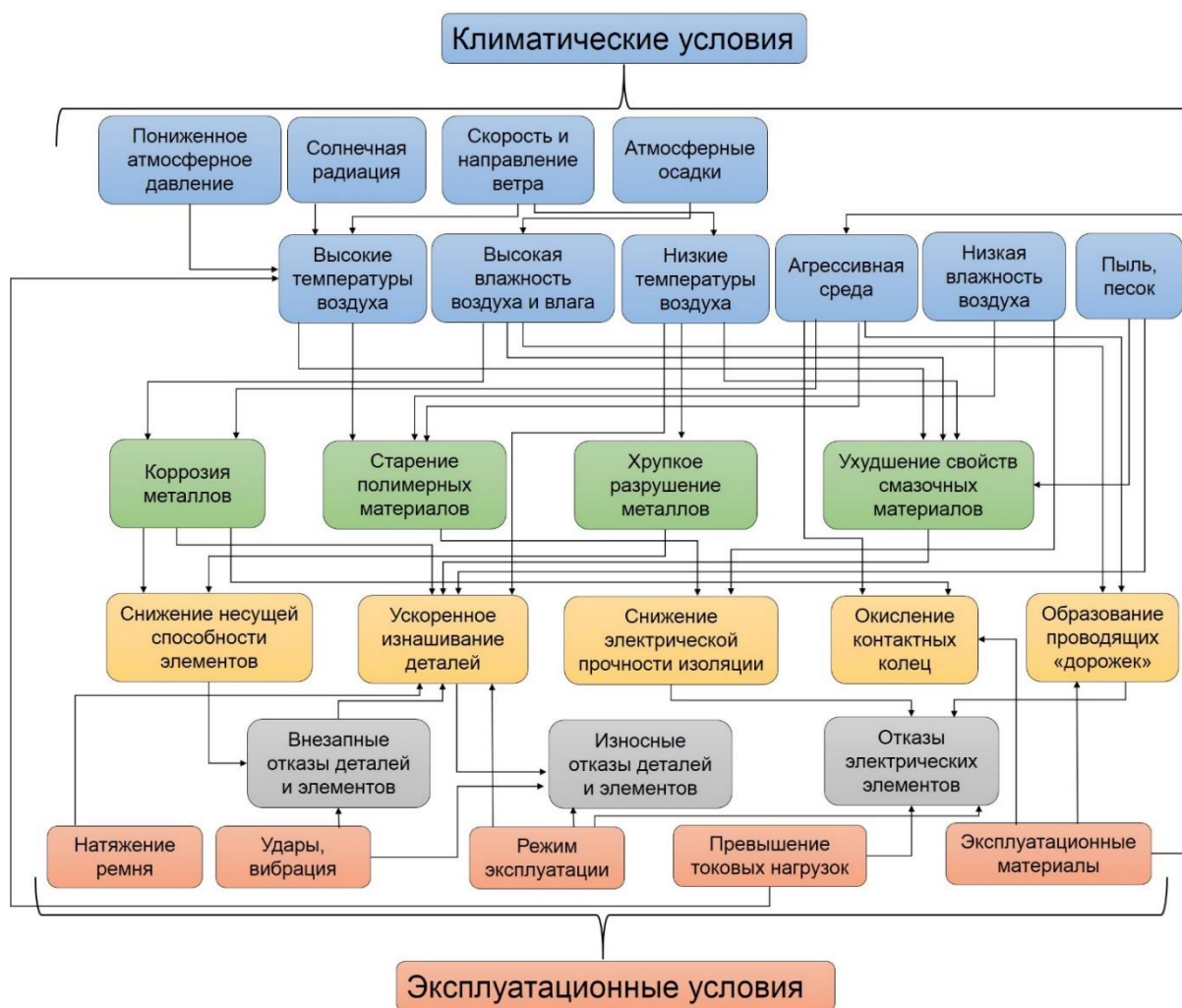


Рисунок 2.7 – Классификация климатических и эксплуатационных факторов

В зависимости от категории эксплуатации и типичных факторов, определяющих скорость, время работы и пробег транспортных средств, средняя интенсивность эксплуатации за один год колеблется от 1100 до 3300 ч.

Категория эксплуатации, сменность работы и средняя скорость движения определяют среднегодовой пробег автомобилей и температурный режим автомобильных генераторов.

В таблице 2.3 приведены экспериментально полученные результаты скоростного, нагрузочного и температурного режимов эксплуатации автомобильных генераторов в условиях городских, междугородных, пригородных поездок и на строительных работах.

Из представленных экспериментальных данных следует, что в зависимости от типа транспортного средства, его назначения, режима работы и условий движения меняются нагрузочный и температурный режим и суммарное время работы электрооборудования.

Эксплуатация автомобиля в городских условиях ведет к значительному снижению средней скорости движения, а значит к снижению частоты вращения ротора генератора (см. рисунок 2.8, 2.9). Поскольку эффективность самовентиляции автомобильного генератора прямо пропорциональна квадрату частоты вращения ротора, то этот фактор также приводит к росту тепловой напряженности генератора.

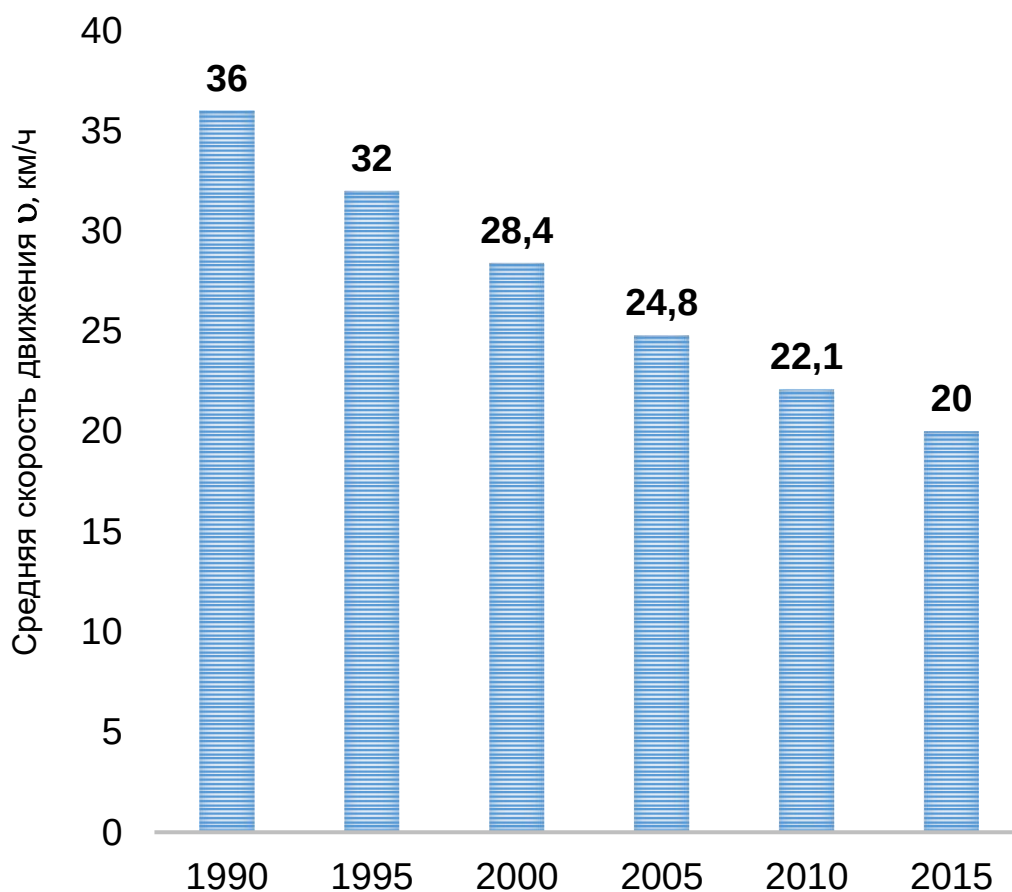


Рисунок 2.8 – Снижение средней скорости движения в городских условиях (на примере г. Оренбурга)

Таблица 2.3 – Режимы работы генераторов условиях городских, междугородных, пригородных поездок [33]

Показатель	Поездки							Типовые условия эксплуатации					
	городские			междугородные			Пригоро дные	Легковые		Грузовые		Автобусы	
	Легко вые	Грузов ые	Автобус ы	Легков ые	Грузов ые	Автобус ы		Такси	Служеб ные	В городе	На стро ительных работах	В городе	Междуг ородные
Скоростной режим													
Средняя частота вра- щения, мин-1	2300	2150	2150	4300	3650	3650	2250	2600	2600	2400	2200	2400	2200
Максимальная частота вращения, мин-1	4000	4000	4000	6500	5000	5000	5000	4000	4000	4000	4000	5000	5000
Число разгонов на 1000 км	4000	4000	6000	1000	1000	1000	2000	3500	3500	3500	2300	5250	2300
Суммарное число оборотов на 1000 км	4,5·10 ⁶	5,0·10 ⁶	5,0·10 ⁶	4,0·10 ⁶	4,2·10 ⁶	4,2·10 ⁶	6,0·10 ⁶	4,4·10 ⁶	4,4 106	4,9·10 ⁶	5,0·10 ⁶	4,9·10 ⁶	4,4·10 ⁶
Нагрузочный режим													
Относительная сред- негодовая продолжи- тельность работы в периоды:													
зимний (ночь)	—	—	—	—	—	—	—	0,20	0,10	0,10	0,10	0,10	0,20
летний (день)	—	—	—	—	—	—	—	0,48	0,54	0,54	0,54	0,54	0,48
Температурный режим													
Максимальная температура, °С:													
зимой	50	50	50	50	50	50	—	—	—	—	—	—	—
летом	65	65	65	60	60	70	—	—	—	—	—	—	—

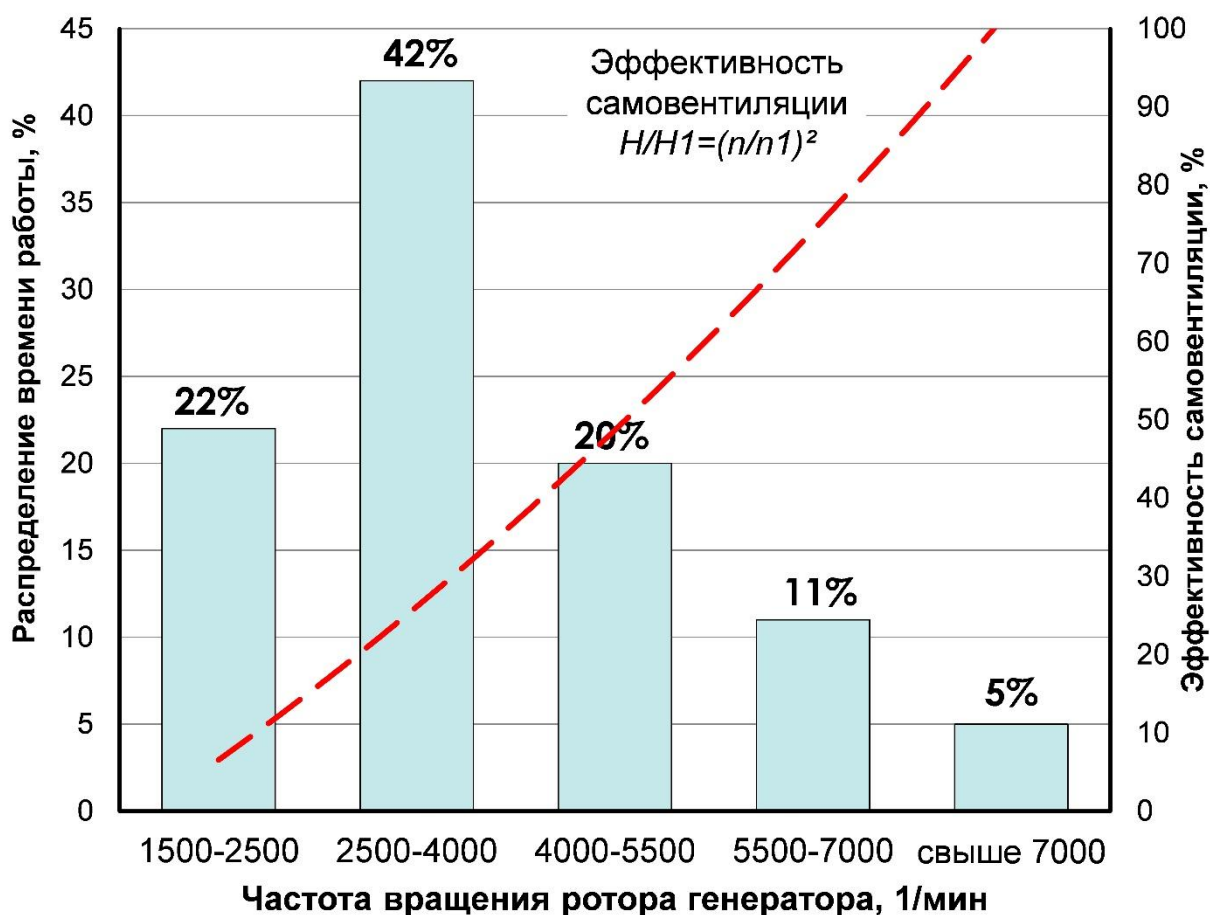


Рисунок 2.9 – Типовой скоростной режим работы генератора в городских условиях

Один и тот же автомобиль, эксплуатируемый при одинаковой температуре окружающего воздуха, но в различных условиях, имеет также различные температуры подкапотного воздуха. Если автомобиль эксплуатируется на загородной дороге, то температура воздуха под капотом будет несколько ниже, чем в городских условиях с интенсивным движением и частыми остановками.

Это объясняется тем, что при остановке автомобиля резко ухудшается вентиляция подкапотного пространства, кроме того, излучается тепло от двигателя и выпускного трубопровода (особенно при выключении двигателя).

Неблагоприятное сочетание экстремальных режимов эксплуатации может привести к коротким замыканиям, и даже пожарам в подкапотном пространстве (рисунок 2.10) [Сидорин Е.С. «Совершенствование

организации технического обслуживания элементов системы электрооборудования легковых автомобилей», Разговоров К.И. «Методика определения причины возгорания автомобиля», Hansen, P.W. «Alternator fires in vehicle»].

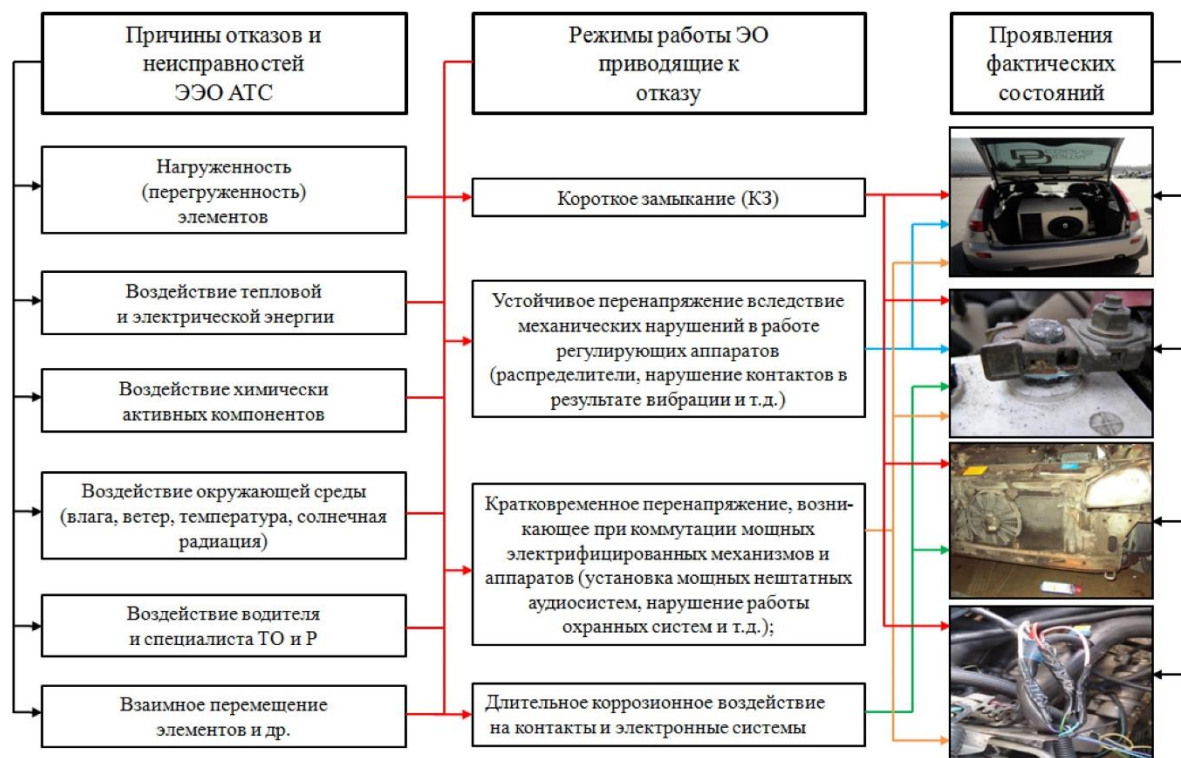


Рисунок 2.10 – Качественная взаимосвязь причин отказов и режимов работ элементов электрооборудования АТС [42]

Основными механическими воздействиями в процессе эксплуатации являются вибрационные, ударные линейные и акустические нагрузки. Одним из наиболее опасных видов механического воздействия является вибрация — колебания изделий и каких-либо его частей или составных элементов; в результате возникают деформация и механические напряжения в конструктивных элементах и комплектующих изделиях. Возникновение вибрации деталей автомобильных генераторов обусловлено работой двигателя внутреннего сгорания и вибрацией элементов кузова или шасси транспортного средства из-за неровностей дорожного полотна [33].

Вибрация, возникающая при работе силового агрегата, характеризуется высокой частотой, кратной примерно половине частоты

вращения двигателя. Вибрации, связанные с неровностями покрытия дорожного полотна и характером дорожного движения (разгоны, резкое торможение и т. д.), отличаются нерегулярностью и охватывают широкий частотный диапазон.

Ударные нагрузки возникают при резком изменении скорости или направления движения транспортного средства, а также в случае движения автомобиля по очень большим неровностям дорожного полотна (тряска).

В результате вибрационных и ударных нагрузок автомобильные генераторы могут иметь отказы, связанные с поломками в местах крепления к двигателю внутреннего сгорания.

Вибрационные нагрузки, которым подвергаются изделия автомобильного электрооборудования приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Вибрационные нагрузки, воздействующие на электрооборудование автомобилей

Место установки	На двигателе	В моторном отсеке и кузове
Ускорение, м/с^2 :		
максимальное	$20g^1$	5g
предельно допустимое	40g	10g
Частота, Гц	50 – 2000	20 – 120
Примечание: $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения		

Привод генератора осуществляется поликлиновым ремнём, не всегда имеющим натяжное устройство. Уменьшение натяжения приводит к снижению величины выходного напряжения, а, следовательно, к недозаряду аккумуляторной батареи. Нередко недостаточное натяжение ошибочно принимается за неисправность генератора [58].

Избыточное натяжение приводного ремня вызывает увеличение радиальных сил, воздействующих на подшипники автомобильного генератора, что неблагоприятно сказывается на ресурсе их работы

(особенно переднего подшипника). Согласно [24] при увеличении нагрузки на подшипник в 2 раза его долговечность уменьшается примерно в 10 раз.

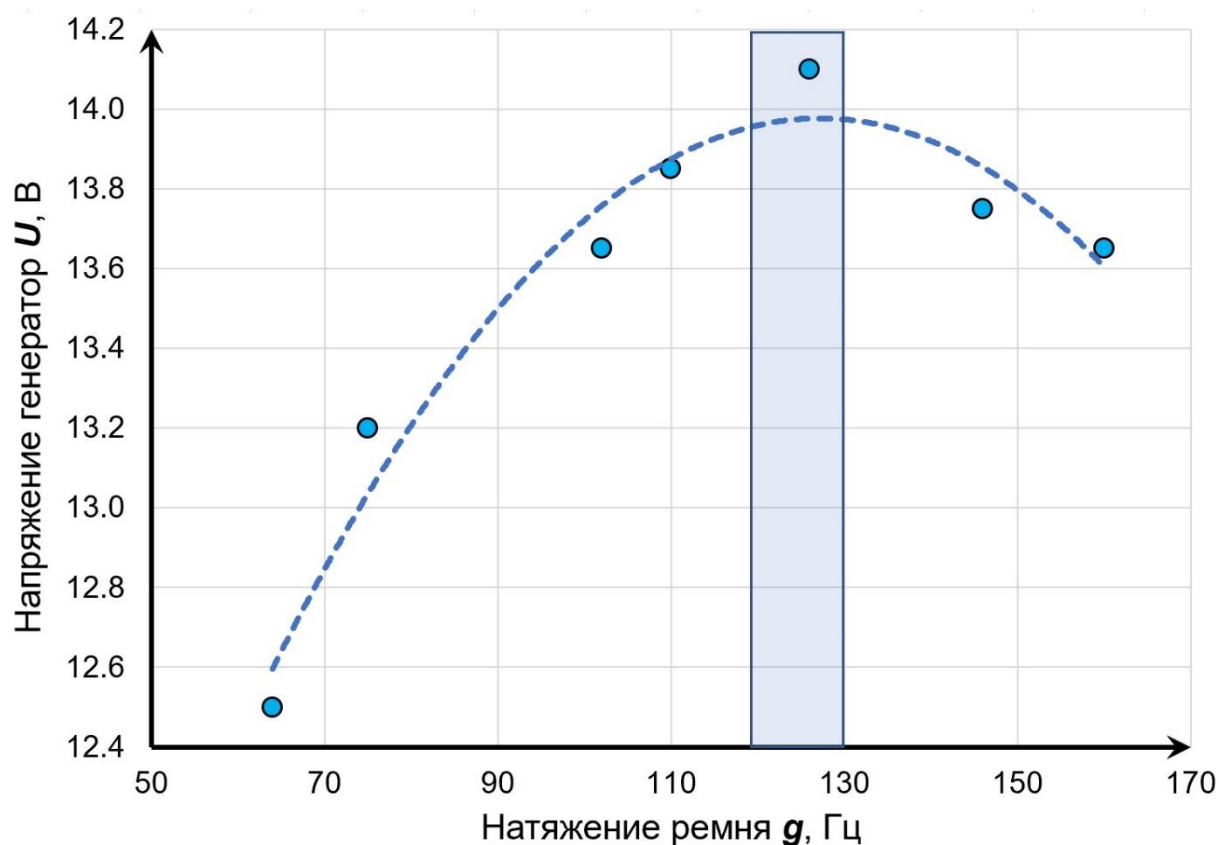


Рисунок 2.11 – Зависимость напряжения генератора от натяжения приводного ремня

Электрооборудование автомобилей подвергается физико-химическому воздействию эксплуатационных материалов [55] (масла, топливо, антифриз, электролит и т. п.), изменяющему свойства материалов и вызывающему отказы. Возможно разложение прокладочных и изоляционных материалов, вследствие чего увеличивается утечка тока через диэлектрики. Меняются магнитные свойства материалов, их сопротивления, нарушаются электрические соединения, увеличиваются скорости химических реакции.

Под качеством напряжения в бортовой сети автомобилей понимают напряжение, вырабатываемое генератором и регулируемое регулятором напряжения в зависимости от степени заряженности аккумуляторной батареи и нагрузки от потребителей тока, а также пульсаций и

перенапряжений, возникающих в нормальных и аномальных режимах (нормальный режим – режим работы с аккумуляторной батареей, аномальный – без нее) [33].

В таблице 2.5 приведены значения перенапряжений в бортовой сети автомобилей.

Таблица 2.5 – Значения перенапряжений в бортовой сети автомобилей

Номинальное напряжение, В	Мгновенные значения напряжения, В, при длительности напряжения, мс				
	0,0003	0,01	0,3	10	300
Аномальные режимы					
14	150/-20	112/-20	62/0	42/3	21/6
28	150/-56	112/-56	84/0	58/7	42/14
Номинальные режимы					
14	42/6	42/6	28/6	23/6	17,5/10,5
28	56/14	56/14	45/15,5	45/15,5	35/21

В реальных режимах работы систем электроснабжения имеют место перенапряжения различной полярности, амплитуды, различающиеся частотным составом и формой напряжения.

Пульсации напряжения являются периодическим низкочастотным видом перенапряжений, характеризующимся относительной плавностью изменения напряжения во времени. Они являются следствием процесса выпрямления переменного напряжения генератора и работы регулятора напряжения и потребителей с периодическим изменением тока нагрузки. Частота основной гармонической составляющей пульсаций равна нескольким килогерцам (длительность – от долей секунды до долей миллисекунды).

Импульсы перенапряжений могут быть относительно длительными (до нескольких сот микросекунд) и короткими (от нескольких микросекунд) отрицательной и положительной полярности (рисунок 2.12).

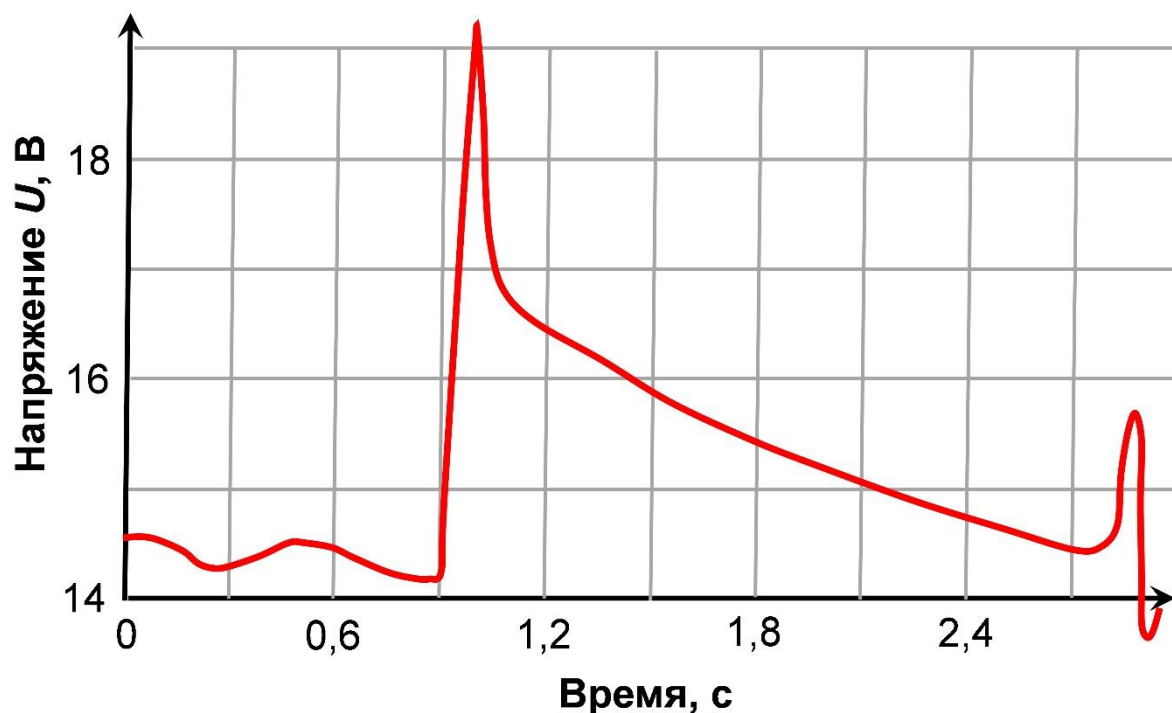


Рисунок 2.12 – Осциллограмма перенапряжения в бортовой сети автомобиля в аномальном режиме сброса нагрузки без аккумуляторной батареи [33]

В процессе эксплуатации на автомобильный генератор воздействуют продолжительные и кратковременные изменения напряжения бортовой сети. Во время пуска двигателя стартером при отрицательных температурах напряжение падает до 3,5 – 6 В. В случае неправильного подключения аккумуляторной батареи (например, при запуске двигателя от внешней батареи) изменяется полярность напряжения.

При неудовлетворительном контакте клемм аккумуляторной батареи появляются импульсы положительной полярности амплитудой напряжения 80 – 120 В и длительностью до 200 мс. При выключении звукового сигнала, стартера возможно возникновение отрицательных импульсов амплитудой до 300 В, а при выключении системы зажигания – до 100 В [55].

Системой зажигания и впрыска генерируются высокочастотные коммутационные импульсы с неопределенной частотой повторения (от однократного импульса до частоты 1 кГц). Их длительность доходит до 10

мкс, а амплитуда напряжения – до 150 В. Частота импульсов, генерируемых системой зажигания, находится в диапазоне от 10 до 500 Гц. Эти импульсы имеют длительность 10 – 300 мкс и амплитуду напряжения до 112 В.

Продолжительность импульсов переходных режимов системы электроснабжения доходит до 300 мс, а максимальная амплитуда напряжения при данной длительности составляет 21 В.

При работе с отключенной аккумуляторной батареей пульсация выпрямленного напряжения становится значительной.

Установка дополнительных электропотребителей большой мощности (например, акустических систем высокого класса) приводит к токовой перегрузке деталей автомобильных генераторов (обмоток, диодов выпрямителей), и как следствие, тепловому воздействию электрического тока. Изоляция обмоток и полупроводниковые приборы имеют определенный запас прочности, который легко может быть превышен при совместном тепловом воздействии окружающей среды и выделении тепла деталями автомобильного генератора [185, 203].

Применение защиты картера двигателя способствует устранению вероятности попадания влаги и загрязняющих веществ с дорожного полотна на детали автомобильного генератора, но приводит к росту температуры подкапотного пространства.

Допустимый температурный режим элементов автомобильных генераторов представлен в таблице 2.6 [33].

Таблица 2.6 – Допустимый температурный режим элементов автомобильных генераторов

Наименование элементов автомобильных генераторов	Допустимое превышение температуры, °С для классов изоляции				
	А	Е	В	F	Н
Обмотки автомобильных генераторов	-	-	125	140	-
Контактные кольца	100	115	145	155	160
Диоды выпрямителя	-	-	120	145	-

Таким образом, широкий спектр климатических и эксплуатационных факторов, воздействующих на автомобильные генераторы, в большинстве своем неблагоприятно сказывается на их работоспособности. И климатические, и эксплуатационные факторы способствуют росту температуры обмоток, а, следовательно, ведут к уменьшению ресурса работы генераторов.

§8 Выводы по главе

Согласно анализу влияния климатических и эксплуатационных факторов установлено, что большинство из них (солнечная радиация, температура окружающего воздуха, мощность установленных потребителей, скорость движения транспортного средства, пыль и т. п.) способствуют росту температуры деталей генератора.

В свою очередь, существует прямая зависимость между температурой деталей генератора и ресурсом его работы: увеличение температуры на каждые 10 °С сокращает ресурс работы в два раза. Увеличение натяжения приводного ремня увеличивает нагрузку на подшипники и сокращает их срок службы.

Следовательно, при оценке остаточного ресурса работы генераторов транспортных средств необходимо учитывать температуру окружающего воздуха, как один из главных факторов, характеризующих дестабилизирующее воздействие окружающей среды.

Глава 3 Причины возникновения неисправностей автомобильных генераторов

Все причины отказов могут быть сведены в три группы в зависимости от стадии жизненного цикла объекта: дефекты проектирования и конструирования, дефекты изготовления и дефекты эксплуатации.

Решению задач, связанных с дефектами конструирования посвящена работа А. О. Шлегеля [54], в которой предложено увеличить жесткость крепления генератора и толщину корпусной изоляции для увеличения фактического ресурса работы.

На повышение надежности автомобильных генераторов на этапе изготовления направлена работа В. Н. Козловского [19], в которой стабилизация выходных характеристик генераторов обеспечивается за счет индивидуального подбора сборочных единиц по ключевым размерным параметрам.

Девятков В. Д. посвятил свою работу [12] повышению эффективности управления качеством ремонта генераторов на основе разработанной методики ускоренной оценки ресурса контактно-щёточного узла (КЩУ) капитально отремонтированных автотракторных генераторов по результатам стендовых испытаний.

Кухарчук В.В. [25] сосредоточил свое внимание на исследовании диагностических параметров автомобильных генераторных установок на основе параметров выходного напряжения. Имеются предложения по автоматизации постановки диагноза о состоянии генератора.

Диагностированию дефектов автотракторного электрооборудования (в том числе генератора) предназначена диссертация Л. А. Соколова [43]. В ней перечислены неисправности автомобильных генераторов и рассмотрено их диагностирование на основе изменения токоскоростной характеристики, снимаемой на специализированном стенде.

В работе Эль-Сагира [55] выполнен анализ надежности генераторных установок автомобилей в условиях жаркого климата (в условиях Иордании). Предложено изменение конструкции регулятора напряжения с целью повышения безотказности системы электроснабжения.

На повышение эффективности диагностирования технического состояния электрогенератора автомобиля электрорезистивным методом направлена работа [40]. Предложена методика оценки технического состояния подшипников генератора на основе изменения электрического сопротивления смазочного слоя.

Исходя из анализа выполненных исследований, можно сделать вывод что наибольшее внимание авторы уделяют дефектам, возникающим в процессе эксплуатации генераторов транспортных средств.

§1 Неисправности электрооборудования автомобилей

Для обоснования актуальности проблемы исследования рассмотрим долю неисправностей электрического и электронного оборудования автомобилей в сравнении с неисправностями других систем.

В работах Алиева А.А., Денисова И.В., Заятрова А.В., Козловского В.Н. рассмотрены отказы систем автомобилей ВАЗ, среди которых доля, приходящаяся на электрическое и электронное оборудование, составляет от 22,4% до 31,8% (см. рисунок 3.1). Согласно сведениям, приведенным в [42], на элементы электрооборудования приходится в среднем до 34% отказов автомобилей (рисунок 3.2). По данным, приведенным в [32] на электрооборудование автомобилей, приходится от 17% до 25% всех отказов, причем на их устранение приходится до 30% затрат времени.

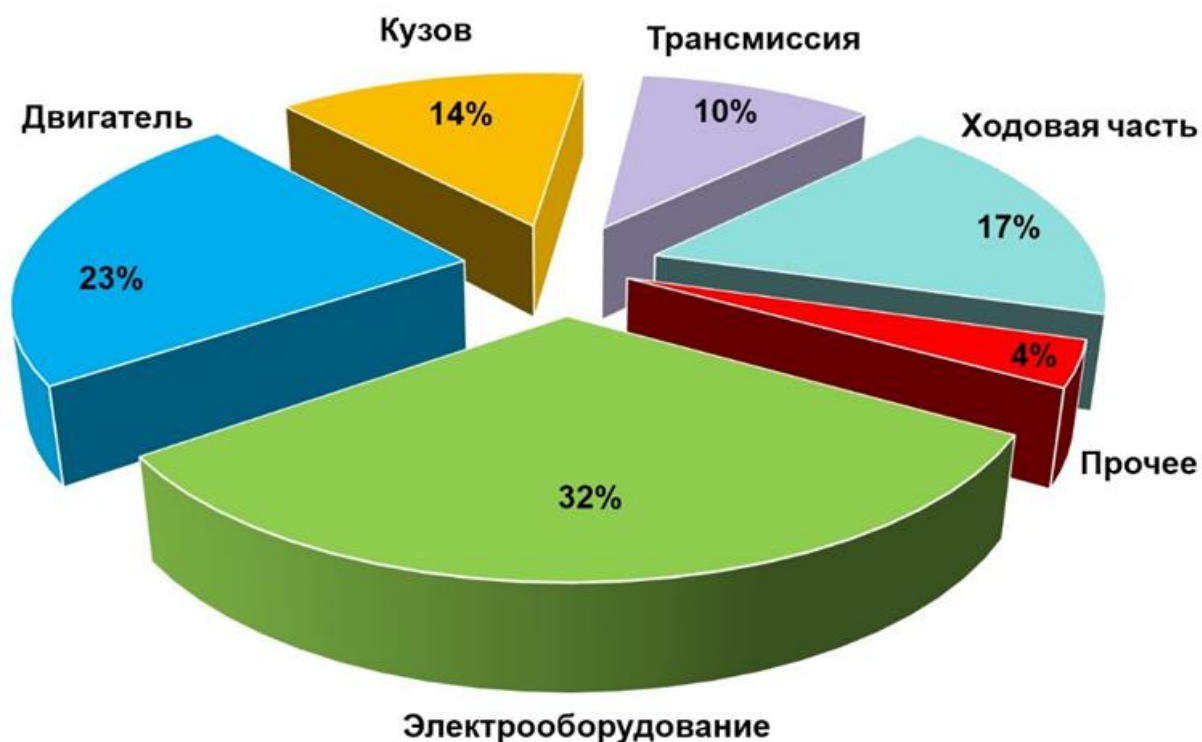


Рисунок 3.1 – Распределение неисправностей автомобилей ВАЗ

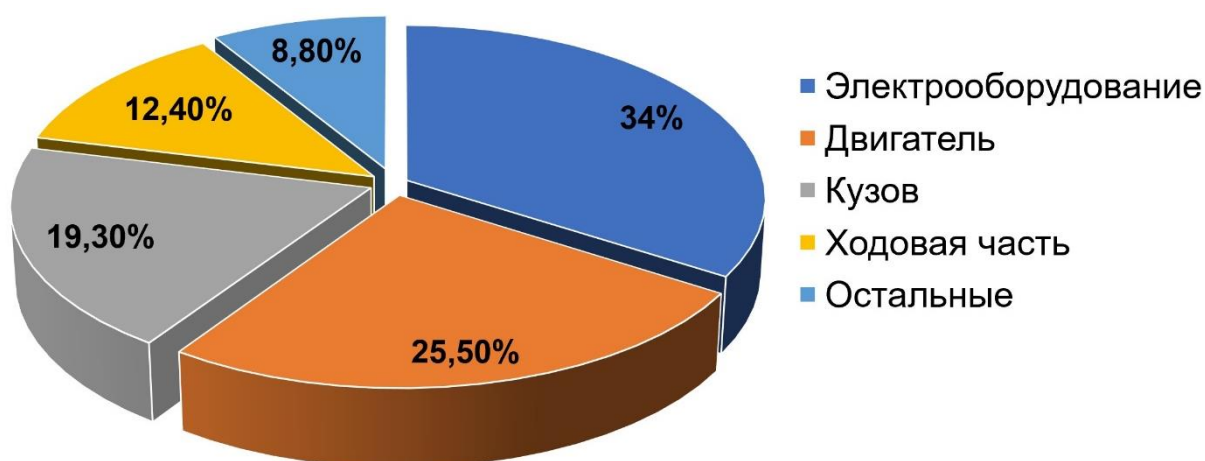
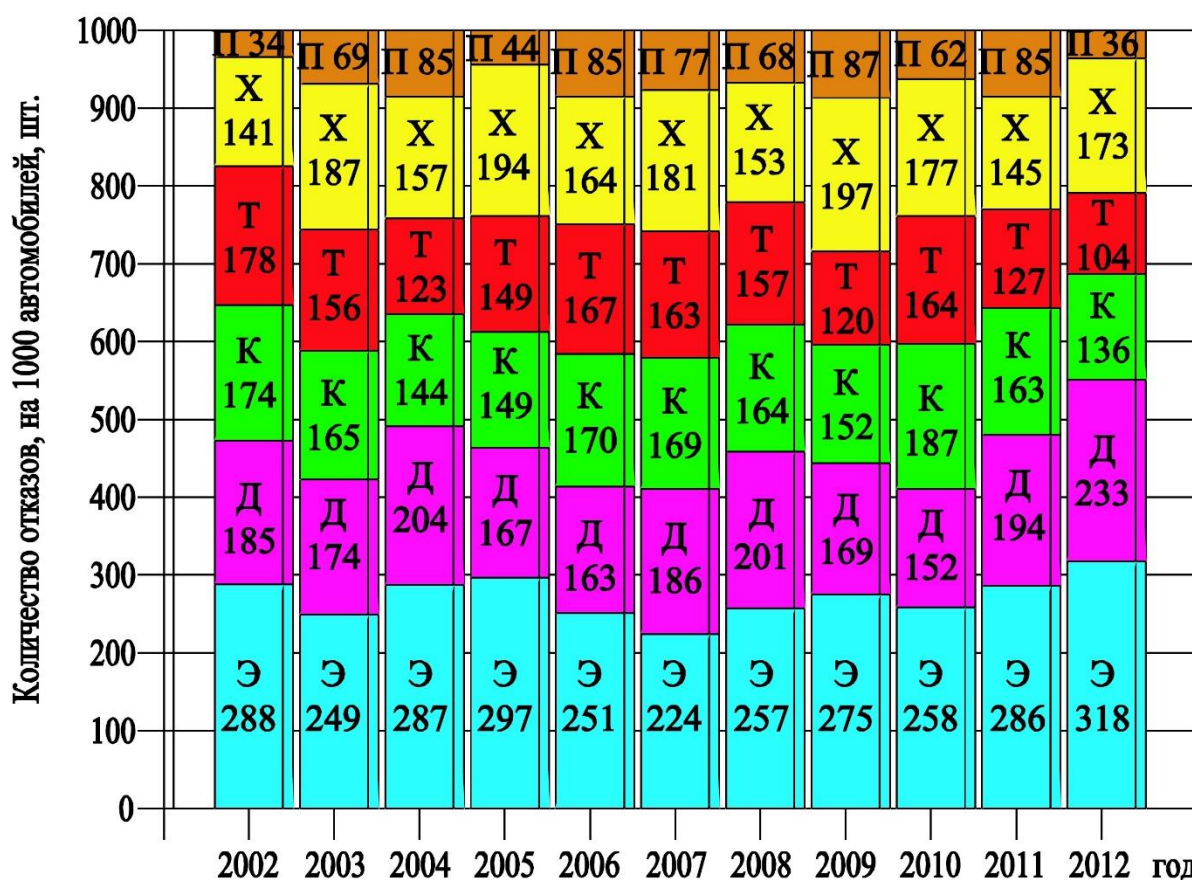


Рисунок 3.2 – Структура неисправностей и отказов агрегатов и систем автомобилей модельного ряда «Lada-Kalina» с 2011 по 2013 гг. [42]

Согласно [20], меньшую надежность имеют электромеханические преобразователи, к которым относятся электростеклоподъемник; моторедуктор заслонки отопителя, электродвигатель вентилятора отопителя; генератор; электродвигатель стеклоочистителя; электроусилитель рулевого управления и другие.

Согласно [17] система электрооборудования стабильно удерживает лидирующую позицию по количеству отказов (рисунок 3.3).



П – прочее; Х – ходовая часть; Т – трансмиссия; К – кузов; Д – двигатель; Э – электрооборудование.

Рисунок 3.3 – Динамика и структура отказов по функциональным системам автомобиля

Для детального рассмотрения причин отказов электрооборудования автомобилей рассмотрим отказы его элементов. В работе [42] к основным неисправностям электрооборудования на примере автомобиля Lada-Kalina относят неисправности системы освещения (29%), системы электроснабжения (20%), системы зажигания (13%), системы пуска и контрольных приборов (по 12%), прочие системы (15%). К деталям электрооборудования с наименьшей вероятностью безотказной работы, согласно [20] можно отнести датчики, электроусилители, генераторы, реле, переключатели и т. п.

Результаты собственных экспериментальных исследований представлены на рисунке 3.4. Можно сделать вывод, что на отказы автомобильных генераторов, являющихся основой системы электроснабжения, приходится значительная доля отказов.

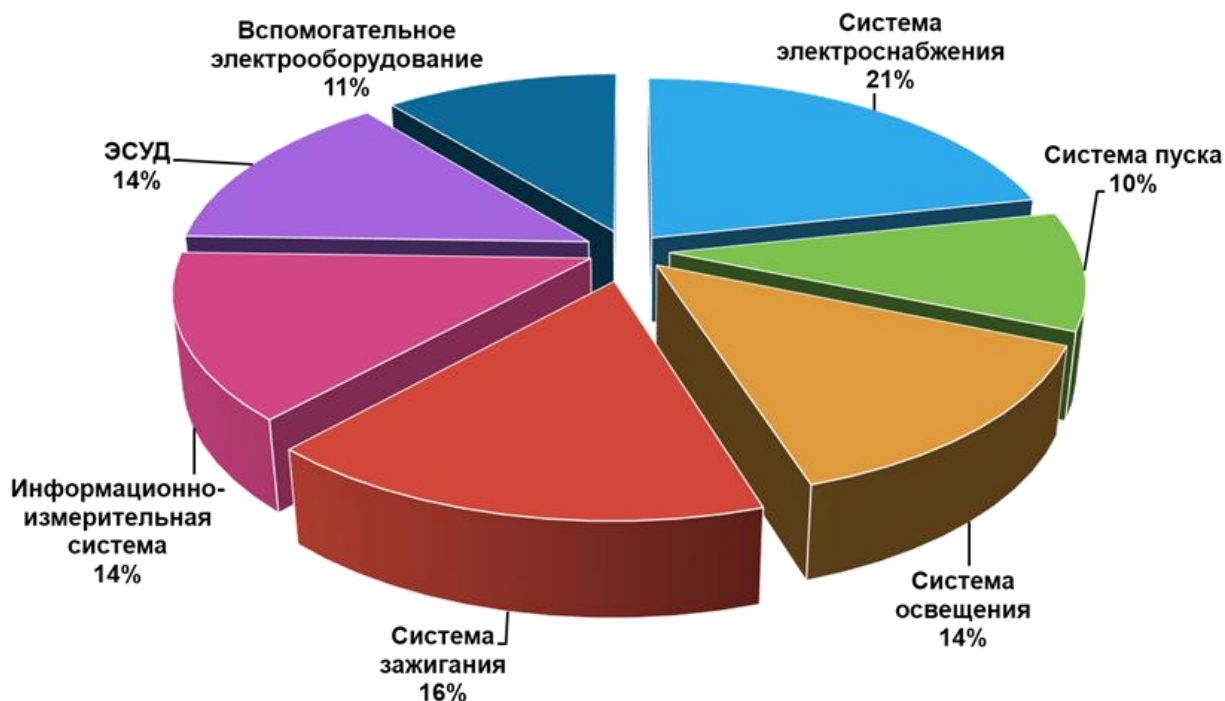


Рисунок 3.4 – Распределение неисправностей электрооборудования автомобилей

§2 Неисправности генераторов транспортных средств

От надёжной работы автомобильных генераторов зависит ресурс работы других элементов электрооборудования и безопасность движения. Напряжение бортовой сети должно находиться в пределах $\pm 3\%$ от номинального, так как увеличение допуска до $\pm 5\%$ приводит к изменению светового потока осветительной и светосигнальной аппаратуры на 20% и снижает в два раза их ресурс [32]. Повышение уровня регулируемого напряжения на 10 – 12% приводит к снижению ресурса АКБ в 2 – 2,5 раза [32].

Отказ генератора приводит к прекращению движения, поскольку аккумуляторная батарея не способна обеспечивать питанием бортовую сеть

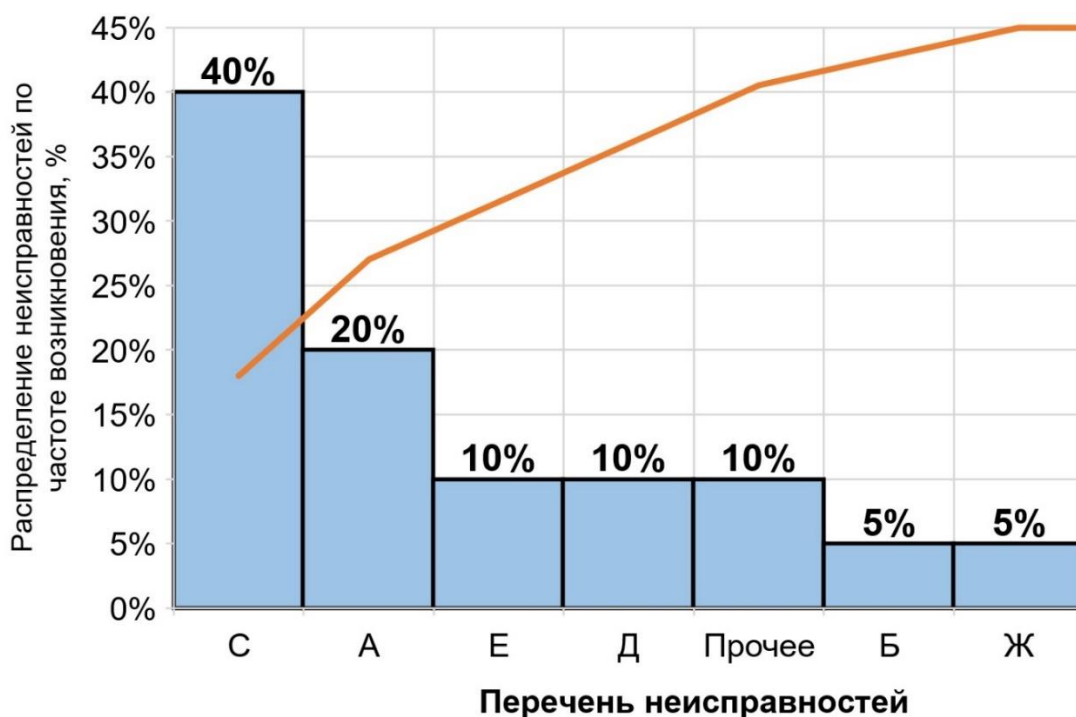
автомобиля больше 30 – 40 минут. В условиях насыщенности автомобилей электрическими и электронными системами, в том числе отвечающими за безопасность движения, повышается вероятность возникновения дорожно-транспортных происшествий (например, отказ генератора вызывает отключение электроусилителя рулевого управления).

Следовательно, обеспечение работоспособности генераторов транспортных средств в эксплуатации является актуальной задачей. Перечень возможных неисправностей генераторов транспортных средств рассматривается в работах Гриценко А.В., Денисова И.В., Козловского В.Н., Коратаева К.Э., Кухарчука В.В., Калиева А.С., Столярова П.Н., Adamiec M., Dziubiński M., Siemionek E., Ayers C.W., Cheng S., Habetler T.G., Hashemi A.B., Pisu P., Kodali A., Zhang Y., Sankavaram C., Pattipati K., Salman M., Moyes A., Burt G.M., McDonald J., Capener J.R., Dray J., Goodfellow R., Mürken M., Kübel D., Kurz A., Thanheiser A., Gratzfeld P., Parkash V., Kumar D., Kumar C., Rajoria R., Scacchioli A., Rizzoni G., Li W., Onori S., Zhang X., Styla S., Wróbel K., Boguta A., Walusiak S., Białczak J., Zhang Y., Rajagopalan S. и других.

Согласно [43] процентное распределение наиболее часто встречающихся неисправностей автомобильных генераторов в виде диаграммы Парето приведено на рисунке 3.5.

В работе [61] большая часть неисправностей отнесена на долю подшипников (рисунок 3.6).

В ряде случаев неисправность, возлагаемая на генератор, оказывается связанной не с ним. Например, в статье [58] (рисунок 3.7) говорится о том, что в большинстве случаев, потребовавших снятия и разборки генератора не выявлено никаких дефектов. Это подтверждает целесообразность совершенствования методов диагностирования генераторов.



А – отсутствие контакта между выводом и контактным кольцом, Б – обрыв концов фаз, С – пробой на массу, Д – межвитковое замыкание, Е – некачественная сварка вывода щёткодержателя, Ж – пробой диодов в выпрямительных блоках

Рисунок 3.5 – Диаграмма Парето по типам неисправностей автомобильных генераторов [236]

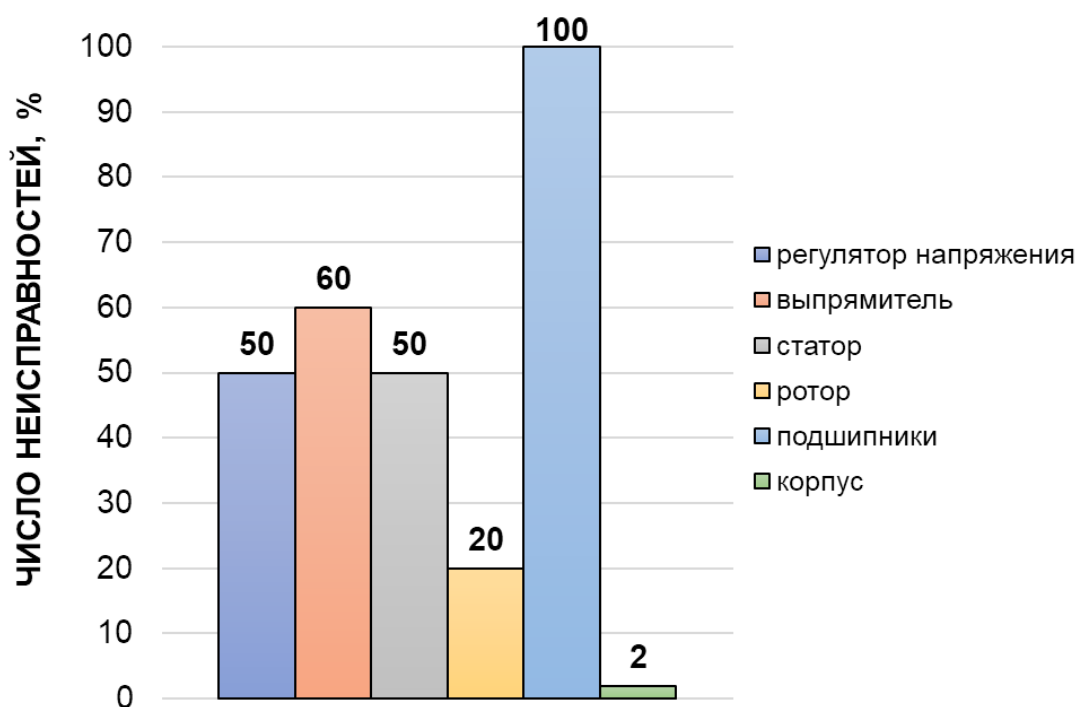


Рисунок 3.6 – Неисправности компактных генераторов

Статистика видов отказов автотракторных генераторов и доля затрат на их устранение, собранная по хозяйствам Челябинской области приведена в таблице 3.1 [12]. Из анализа приведенных данных видно, что наибольшая доля отказов (0,39) и доля удельных затрат на устранение этих отказов в общем объеме издержек (0,32) приходится на контактно-щеточный узел (КЩУ).

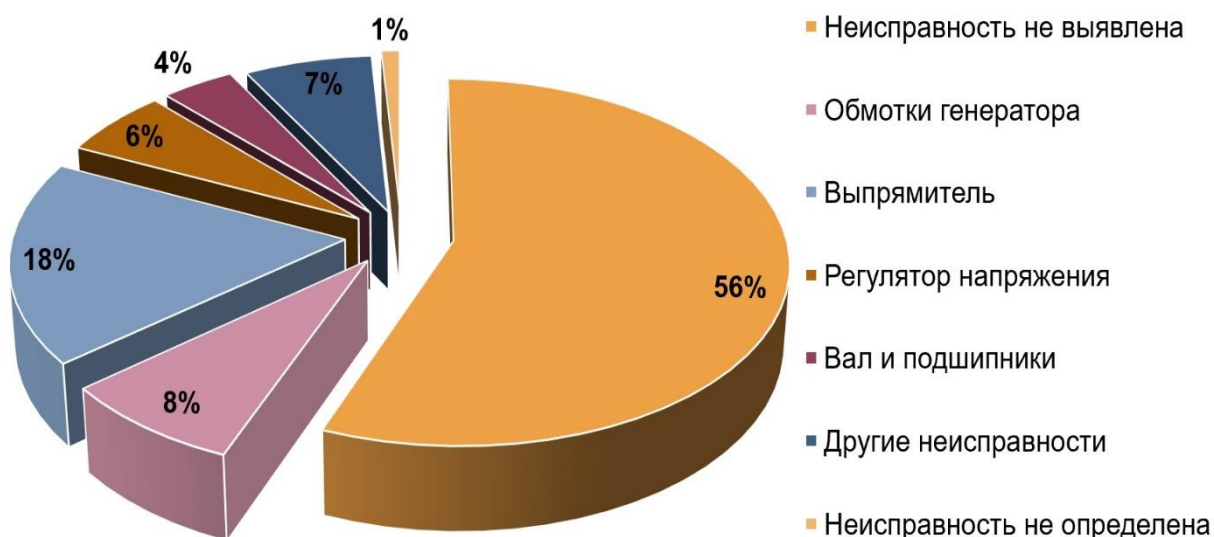


Рисунок 3.7 – Результаты дефектации снятых с двигателя генераторов [58]

Таблица 3.1 – Данные по видам отказов АТГ и доля затрат на их устранение [12]

Наименование узла	Кол-во отказов	Доля отказов	Затраты на устранение одного отказа, р.	Доля затрат
Обмотка статора	20/0	0,1	110	0,24
Подшипники	28/31	0,33	44,4	0,29
Выпрямительный блок	6/8	0,08	50	0,08
Обмотка возбуждения	5/0	0,03	80	0,05
Контактно щеточный	17/53	0,39	42	0,32
Механические дефекты	9/3	0,07	15	0,02
Итого	85/95	1,0	341,4	1,0

Числитель дроби указывает на число отказов, устраненных путем проведения капитального ремонта на специализированных ремонтных предприятиях, знаменатель – число отказов, устраненных путем восстановления внутри хозяйства во время планово-предупредительных работ или оперативного обслуживания.

Авторами статьи [13] выполнен пассивный эксперимент по сбору первичной информации о дефектах и неисправностях генераторной установки автомобилей Lada Kalina. В таблице 3.2 представлены наиболее часто встречающиеся дефекты генераторной установки, их доля в общем объеме возникающих неисправностей, средняя наработка на отказ и среднеквадратическое отклонение.

Таблица 3.2 – Массовые дефекты ГУ автомобиля Lada Kalina [13]

Наименование дефекта	Количество выявленных случаев	Доля данного дефекта, %	Средняя наработка на отказ, тыс. км	Среднеквадратическое отклонение
Отказ генератора	68	30,1	23,9	13,7
Шум при работе генератора	65	28,8	13,5	13,0
Дефект ремня привода генератора	41	18,1	19,7	9,8
Дефект натяжного ролика ремня генератора	30	13,3	14,7	13,1
Отсутствует ток отдачи генератора	11	4,9	10,2	11,5
Расслоение ремня привода генератора	8	3,5	23,6	14,9
Разрушение кронштейна генератора	2	0,9	20,3	20,5
Дефект шкива генератора	1	0,4	1,8	-
Все виды дефектов	226	100	-	-

Из таблицы 3.2 следует, что к наиболее часто встречающимся неисправностям ГУ относятся: отказ генератора, шум при его работе, вызываемый вибрацией подшипника, а также дефекты ремня генератора и натяжного ролика.

Общий перечень неисправностей генераторов транспортных средств включает в себя следующие позиции (см. таблицу 3.3). Неисправности отдельных элементов генераторов объединяем по технологическим признакам в более крупные, которые и будут определяться при диагностировании.

Таблица 3.3 – Неисправности генераторов транспортных средств

Неисправности отдельных элементов	Укрупненные неисправности
1 Износ подшипников генератора	
2 Межвитковые замыкания обмотки ротора	
Нарушение контакта в месте пайки выводов обмотки ротора к контактным кольцам	3 Обрыв обмотки ротора
Обрыв обмотки ротора	
Обрыв щёточных поводков	
4 Замыкание обмотки ротора на корпус	
Ослабление пружин щёткодержателя	5 Повышенное сопротивление между щётками и контактными кольцами
Окисление поверхности контактных колец	
Замасливание поверхности контактных колец	
Зависание щёток	
Износ щёток	
6 Отказ регулятора напряжения	
Обрыв провода конденсатора	7 Отказ конденсатора
Пробой конденсатора	
8 Пробой диодов выпрямителя	
9 Обрыв внутренней цепи диодов выпрямителя	
Нарушение пайки между фазными обмотками статора и выпрямителем	10 Обрыв фазных обмоток статора
Обрыв фазных обмоток статора	
11 Межвитковые замыкания в обмотках статора	
12 Замыкание обмоток статора на корпус	
13 Задевание ротора за статор	

Причинами возникновения данных неисправностей могут быть:

- чрезмерный износ подшипников из-за загрязнения, загустевания или вытекания смазки;
- межвитковые замыкания или замыкание обмоток ротора и статора на корпус из-за разрушения изоляции провода обмоток при перегреве или механическом повреждении (например, вследствие повышенной вибрации при эксплуатации на неровных дорогах);
- обрыв в обмотке ротора автомобильного генератора или статорной обмотке из-за плохой пайки в местах соединений обмотки с контактными кольцами в первом случае и вследствие плохой зачистки от изоляции проводов, идущих к выводам, во втором случае;
- межвитковые замыкания обмотки статора и её замыкание на пластины железа статора из-за плохой межпазовой изоляции;
- износ контактных колец и щёток при завершении срока эксплуатации или при эксплуатации транспорта в запыленной местности;
- пробой или обрыв диодов выпрямительного блока, а также электронных компонентов регулятора напряжения вследствие перенапряжений в бортовой сети или при нарушении технологии производства;
- плохой контакт между щётками и контактными кольцами ротора возникает при загрязнении и замасливании контактных колец, уменьшении усилия щёточных пружин и заклинивании щёток в щёткодержателях.

Распределение причин неисправностей генераторов транспортных средств в процентном соотношении приведено на рисунке 3.8.

Проявление неисправностей генераторов на транспортных средствах приводит к: повышенному нагреву генератора (12%), повышенному шуму при работе (15%), отсутствию (7%) или пониженному выходному напряжению (40%), повышенному выходному напряжению (26%).

Взаимосвязь между конкретной неисправностью и ее проявлением приведена в таблице 3.3.

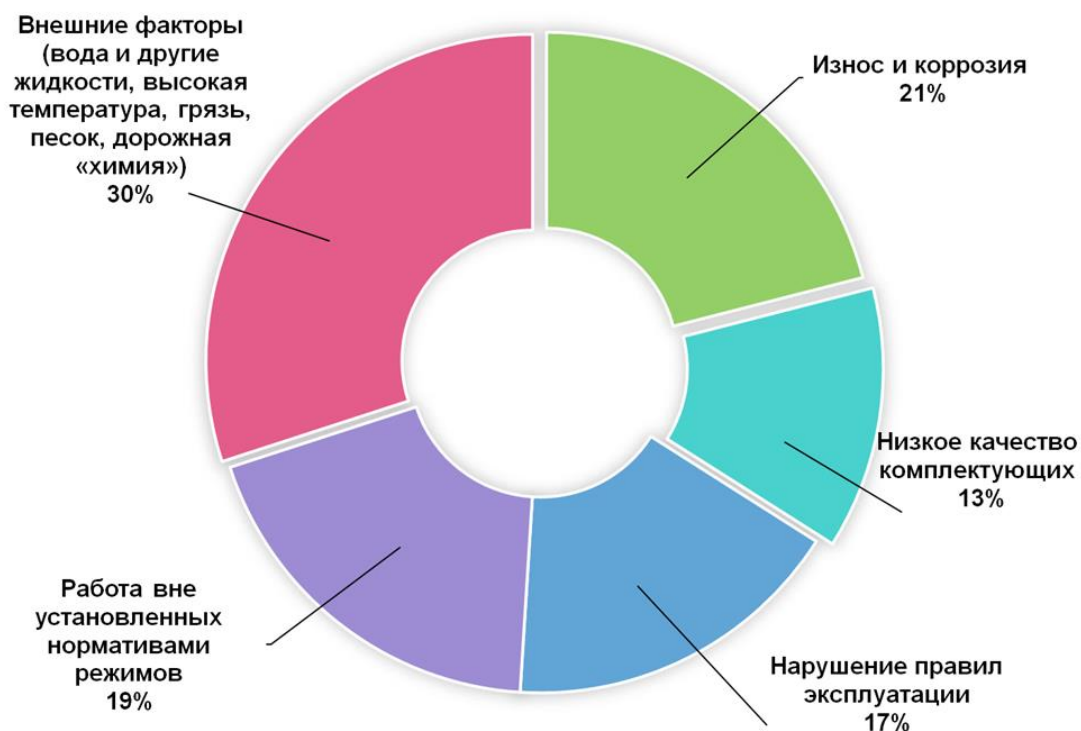


Рисунок 3.8 – Причины неисправностей генераторов

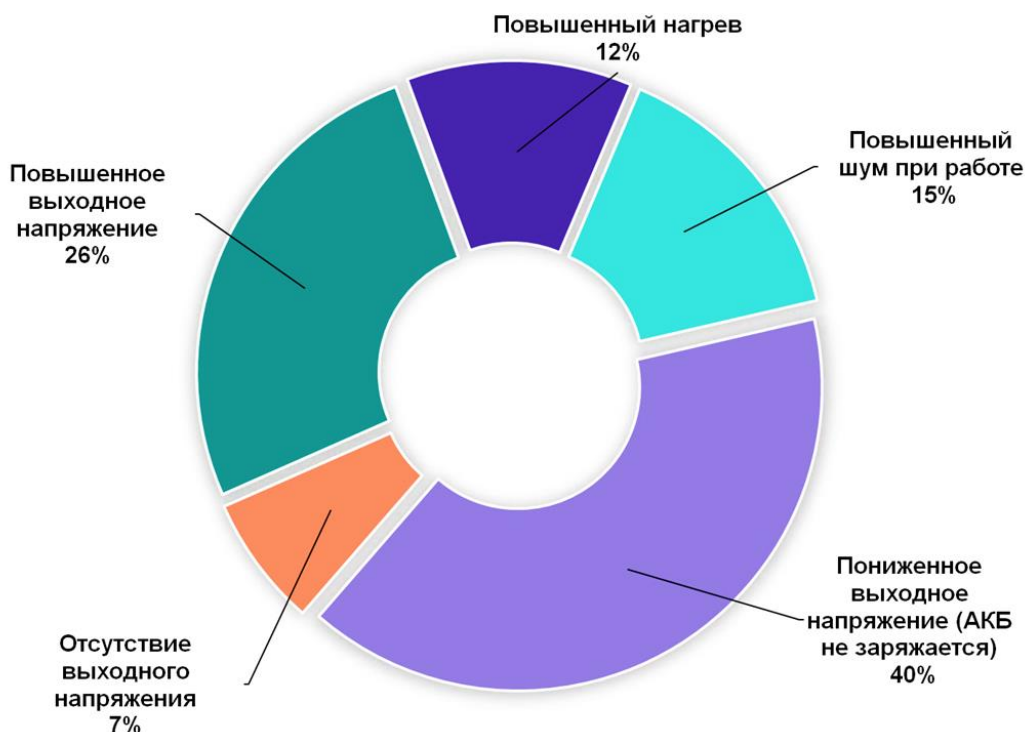


Рисунок 3.9 – Проявление неисправностей генераторов

Таблица 3.4 – Взаимосвязь между неисправностями автомобильного генератора и их проявлениями

Наименование неисправности	Проявление неисправности
Обрыв или проскальзывание ремня из-за износа или недостаточного натяжения шкива	Отсутствие или пониженное выходное напряжение (генератор не обеспечивает заряд аккумуляторной батареи)
Плохой контакт в штекерных соединителях или обрыв в цепях между генераторной установкой и АКБ	
Износ, «зависание» щёток или загрязнение контактных колец	
Обрыв в цепи возбуждения	
Межвитковое замыкание в цепи одной из фаз обмотки статора	
Пробой или обрыв диодов выпрямительного блока	
Выход из строя регулятора напряжения	Повышенный шум при работе генератора
Недостаточное количество смазки в подшипниках или ее отсутствие	
Разрушение сепаратора и заклинивание подшипника. Проворачивание наружной обоймы подшипника в посадочном месте крышки	
Выработка места посадки подшипника в крышке	Повышенное выходное
Неисправен регулятор напряжения из-за пробоя элементов	
Межвитковое замыкание в цепи одной из фаз обмотки статора	Повышенный нагрев генератора
Межфазное замыкание обмоток статора	
Замыкание обмоток статора на корпус	
Короткое замыкание диодов выпрямительного блока	

Таким образом, суммируя опубликованные данные и результаты собственных наблюдений наиболее часто в генераторах транспортных средств возникают следующие укрупненные неисправности (рисунок 3.10).

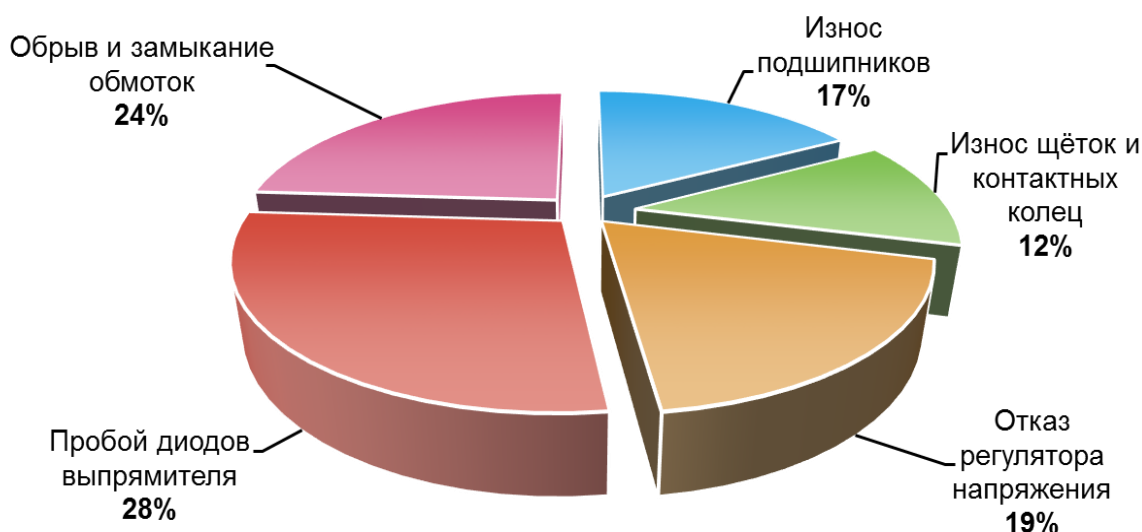


Рисунок 3.10 – Распределение неисправностей генераторов транспортных средств по частоте возникновения

Наиболее часто встречаются неисправности, связанные с дефектами электрических элементов генераторов: диодов выпрямительного блока (обрыв или пробой – 28%), обмоток ротора и статора (обрыв, межвитковые замыкания, замыкания на корпус, межфазные замыкания и т. д. – 24%), регулятора напряжения (потеря способности регулирования напряжения – 19%). К механическим неисправностям можно отнести износ щёток и контактных колец генератора (12%), износ подшипников (17%), износ креплений и т. п.

Таким образом, актуальность приобретает своевременное диагностирование электрических неисправностей автомобильных генераторов, суммарно составляющих около 71% всех неисправностей.

§3 Выводы по главе

Неисправности автомобильных генераторов занимают существенную долю в общей структуре отказов легковых автомобилей ВАЗ (около 7% всех отказов). От надёжной работы автомобильных генераторов зависит ресурс

работы других элементов электрооборудования и безопасность движения, так как агрегаты современного автомобиля обладают большим электропотреблением, и ряд из них (электроусилитель рулевого управления, актуаторы роботизированной коробки передач и т. д.) отключается при выходе из строя генератора. Всего 29% неисправностей связаны с механической частью генератора, а остальные вызваны отказами электрических элементов (обмоток, выпрямительного блока, регулятора напряжения), следовательно, необходимо своевременно определять и прогнозировать возникновение подобных отказов.

Часть 2 Обоснование диагностических параметров генератора

Глава 4 Диагностирование генераторов транспортных средств

§1 Классификация методов и средств диагностирования генераторов транспортных средств

Для оценки технического состояния узлов и агрегатов автомобиля разработано большое количество методов диагностирования, отличающихся по измеряемым параметрам, принципу измерения, способу определения, применяемым средствам и т.д. Методы диагностирования автомобилей и их составных частей рассматриваются в работах Авдонькина Ф.Н., Аринина И.Н., Болдина А.П., Борца А.Д., Гольдштейна О.С., Денисова А.С., Жомиру В.Н., Королева Н.К., Малкина В.С., Мигаля В.Д., Мирошникова Л.В., Михлина В.М., Мороза С.М., Рассохи В.И., Сергеева А.Г., Спичкина Г.В., Иванова В.И., Кузнецова Е.С., Ключева В.В., Токарева А.Н., Федотова А.И., Харазова А.М., Хасанова Р.Х., Щурина К.В., Якунина Н.Н. и других..

Закономерности изменения технического состояния электрооборудования автомобилей в процессе эксплуатации рассмотрены в работах А. В. Акимова, А.Г. Сергеева, В.Е. Ютта, Н.М. Ильина, Ю.Л. Тимофеева, Д.А. Соснина, В.А. Набоких, Ю.П. Чижкова, А.М. Резника, В.Н. Козловского, В.В. Литвиненко, Б.А. Данова, В.Ф. Яковлева и других.

Классификация современных методов диагностирования автомобильных генераторов приведена на рисунке 4.1.

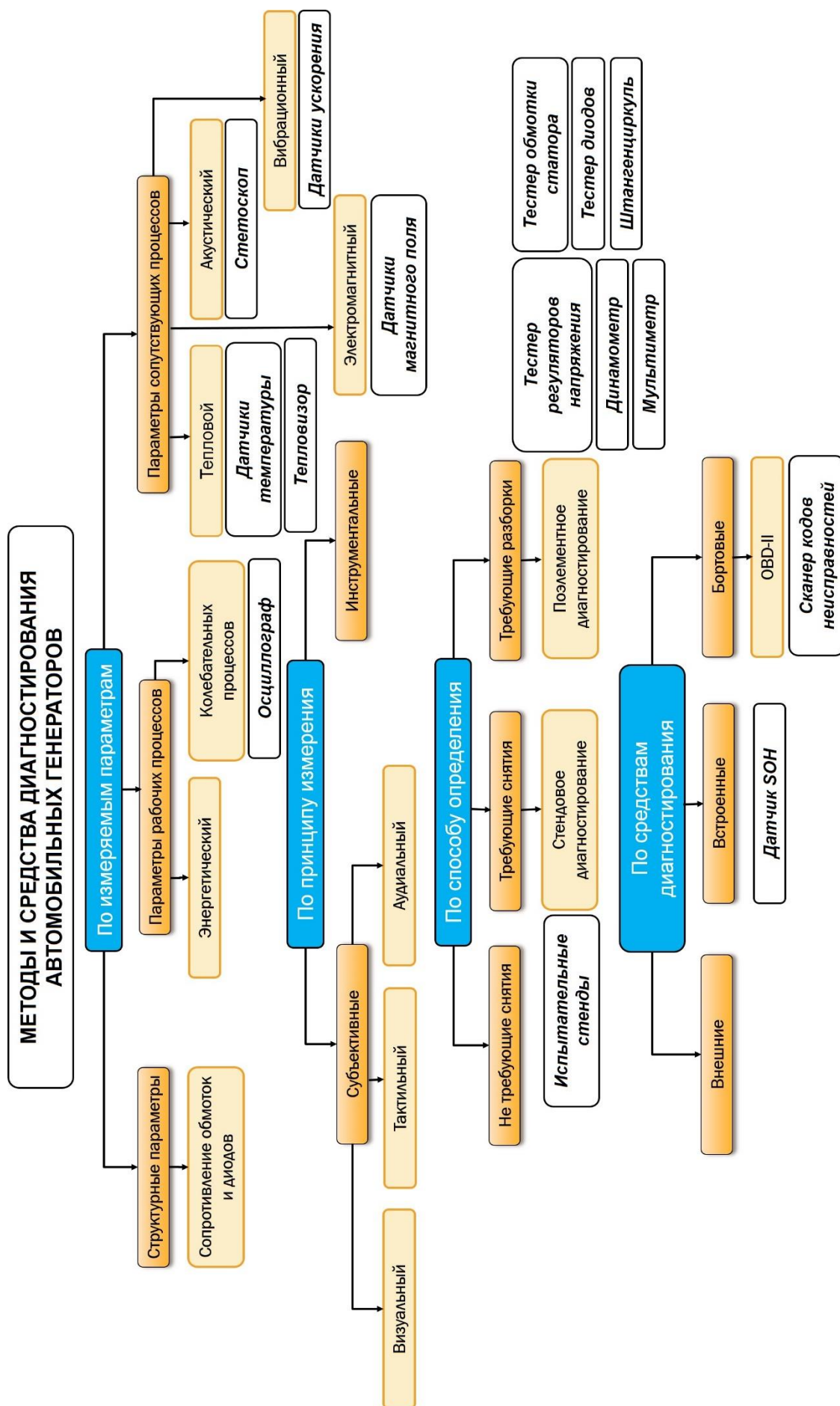


Рисунок 4.1 – Классификация методов диагностирования автомобильных генераторов

В основу классификации положены следующие признаки: измеряемые параметры (структурные, рабочих и сопутствующих процессов); принцип измерения (субъективные и инструментальные); способ определения (требующие или нет снятия с автомобиля и разборки); средства диагностирования (внешние, встроенные и бортовые).

§2 Прямые методы диагностирования

Прямые методы (поэлементное диагностирование, дефектация) обладают такими достоинствами, как точность, наглядность, достоверность, возможность применения достаточно простой технологии измерений и несложного инструмента. В таблице 4.1 представлена характеристика поэлементного диагностирования автомобильных генераторов.

Только с помощью прямых методов возможно определение структурных параметров, непосредственно связанных с работоспособностью генератора. К таким параметрам можно отнести: электрические сопротивления обмоток статора и ротора, межвитковой и корпусной изоляции, полупроводниковых диодов; диаметр и биение контактных колец; высота щеток; люфт подшипников и т. д. Контролируемые значения этих параметров приводятся в технологических инструкциях [3].

Описанию процедур определения технического состояния автомобильных генераторов с использованием прямых методов диагностирования посвящены работы [4, 41].

В настоящее время для поиска неисправностей в элементах автомобильного генератора зарубежные фирмы предлагают тестеры для проверки [4]:

- обмотки ротора (возбуждения);
- обмотки статора;

- диодных мостов;
- регуляторов напряжения с адаптерами для каждого типа регулятора.

Таблица 4.1 – Характеристика прямых методов диагностирования автомобильных генераторов

Наименование элемента генератора	Наименование параметра технического состояния	Используемое оборудование	Определяемые неисправности
Выпрямительный блок	Сопротивление диодов, Ом, в прямом и обратном направлении	Мультиметр, тестер диодов и диодных мостов	Пробой и обрыв цепи диодов
Статор в сборе	Сопротивление фаз статора, Ом, и сопротивление изоляции, кОм	Мегомметр, амперметр/вольтметр, прибор для проверки обмоток	Замыкание фазы статора на корпус, межвитковые замыкания фазы статора, обрыв фазы статора, межфазные замыкания
Ротор в сборе	Сопротивление обмотки ротора, Ом, и сопротивление изоляции, кОм; диаметр контактных колец, мм, биение контактных колец, мм	Мегомметр, мультиметр, штангенциркуль, прибор для проверки обмоток	Износ и выработка контактных колец, замыкание обмотки ротора на корпус, межвитковые замыкания обмотки ротора, обрыв обмотки ротора
Щёткодержатель	Высота щёток, мм; усилие пружин, Н	Штангенциркуль, динамометр	Износ щёток, плохой контакт между щётками и контактными кольцами
Регулятор напряжения	Регулируемое напряжение, В	Мультиметр, тестер регуляторов напряжения	Отказ регулятора напряжения

Такие тестеры (рисунки 4.2 – 4.4) являются дорогостоящими приборами, которые целесообразно использовать только на крупных ремонтных предприятиях.

Для поиска таких неисправностей как обрывы и короткие замыкания можно использовать более дешевые измерительные приборы, такие как мультиметр, омметр.

Для проверки обмоток статора и ротора следует включить мультиметр на измерение сопротивления и подсоединить его щупы к контактным кольцам (рисунок 4.5, а). У исправного генератора сопротивление обмотки должно быть в определенных пределах. Так у генераторов 2112-3701010 сопротивление обмотки составляет 2,1 – 2,5 Ом [3].

Если мультиметр покажет бесконечно большое сопротивление, значит обмотка ротора имеет обрыв. При уменьшении сопротивления относительно паспортных значений в обмотке имеются межвитковые замыкания.



Рисунок 4.2 – Тестер регуляторов напряжения



Рисунок 4.3 – Тестер статора генератора



Рисунок 4.4 – Тестер выпрямительного блока

Проверка замыкания обмотки на «массу» производится подсоединением щупов мультиметра к одному из контактных колец и к валу

ротора (рисунок 4.5, б). Мультиметр должен показать разрыв цепи у исправной обмотки. Аналогично проверяется обмотка статора генератора (рисунок 4.5, с и d). Точное определение межвитковых замыканий обмоток статора и ротора требует применения специальных приборов, например, прибора ПДО-1 [4].

Проверка диодов выпрямительного блока производится после отсоединения его от обмотки статора мультиметром, включенным на измерение сопротивления в кОм (рисунок 4.6). Измерительные щупы мультиметра подсоединяются: один к одному из радиаторов блока, а другой — к фазовому выводу выпрямительного блока. Затем измерительные щупы меняют местами. Если при переподсоединении измерительных щупов мультиметра его показания резко меняются, то диод исправен. В противном случае он вышел из строя.

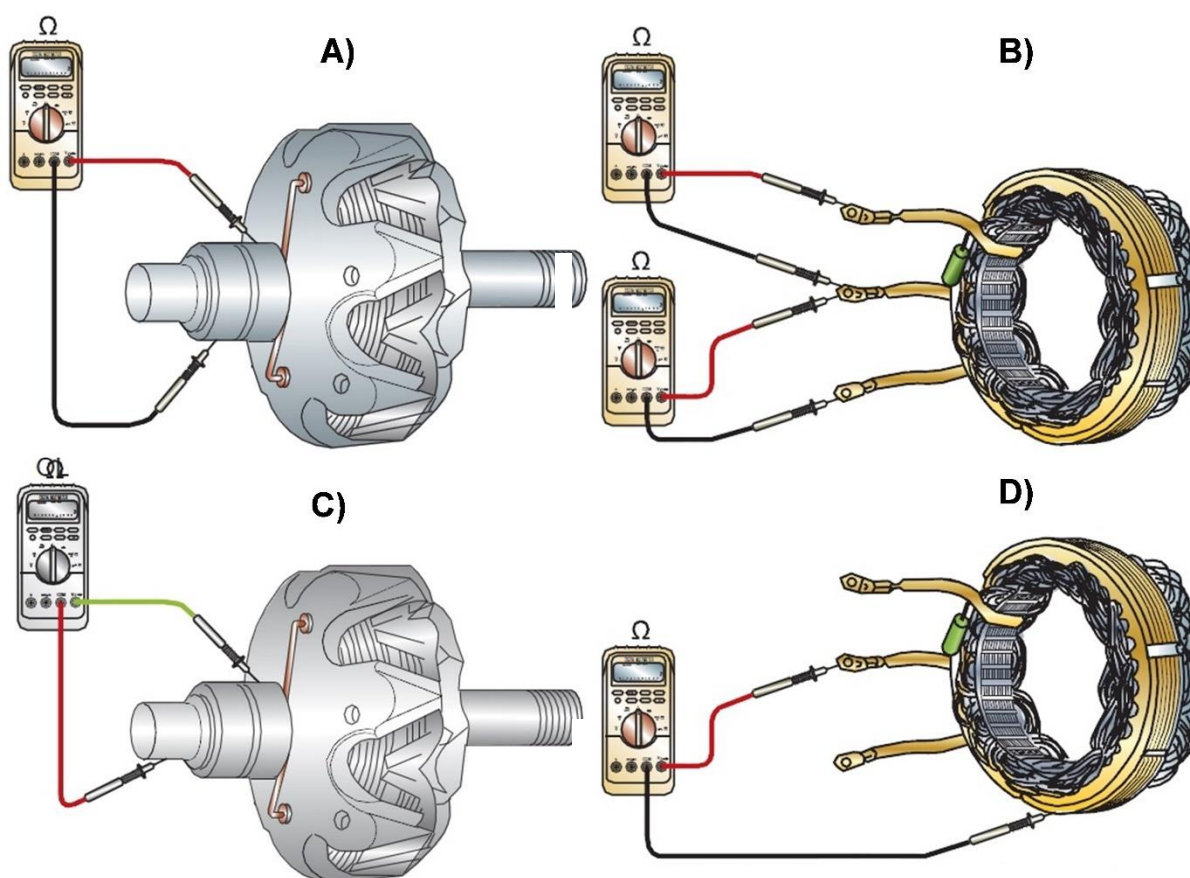


Рисунок 4.5 – Измерение электрических сопротивлений обмоток статора (а) и ротора (б) и их корпусной изоляции (с, d)

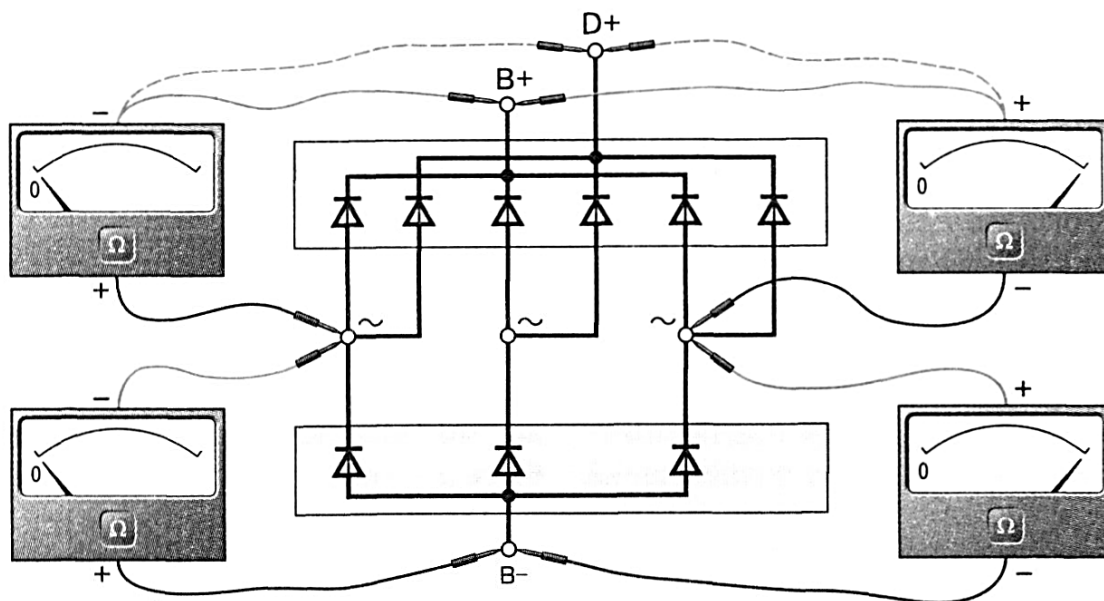
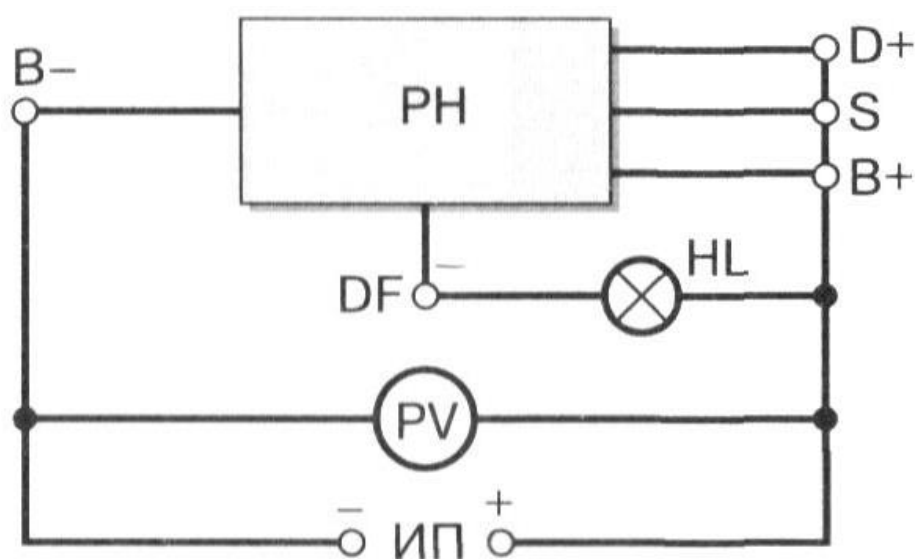


Рисунок 4.6 – Проверка диодов выпрямительного блока

Проверку регулятора напряжения, снятого с генератора, можно произвести по схеме, показанной на рисунке 4.7 [4].



В- выход регулятора на «массу», В+ «плюс» бортовой сети, DF – вывод на обмотку ротора, HL – контрольная лампа, PV – вольтметр, ИП – регулируемый источник питания, PH – проверяемый регулятор напряжения

Рисунок 4.7 – Проверка регулятора напряжения

Вывод регулятора, соединенный с положительным выводом В+ подключают к плюсовому выводу регулируемого источника постоянного тока (ИП) с напряжением 12...16 В, минусовой вывод которого подсоединяется к минусовому выводу регулятора. Контрольная лампа НЛ мощностью не более 6 Вт включается между теми же выводами, к которым подключается обмотка возбуждения генератора. Чаще всего этими выводами являются выводы D+ и DF. Исправность регулятора определяется в соответствии с таблицей 4.2.

Таблица 4.2 – Определение исправности регулятора напряжения

Напряжение ИП, В	Регулятор исправен	Регулятор неисправен
12...12,5	X	0 X
15...16	0	0 X
X – лампа горит, 0 – лампа не горит		

Проверку регуляторов напряжения, вступающих в работу по сигналу с электронного блока управления двигателя внутреннего сгорания, можно выполнить либо с помощью вышеуказанных тестеров, либо используя специально разработанные приставки, имитирующие подобный сигнал (рисунок 4.8).



Рисунок 4.8 – Приставка управления регуляторами напряжения генераторов

Усилие прижатия щётки пружиной к контактным кольцам измеряют динамометром в момент, когда щетки выступают из щеткодержателя на 2 мм (предельные усилия см. в таблице 4.3) [32]. Остаточная высота выступающей части щёток из щёткодержателя должна быть более 5 мм [4].

Таблица 4.3 – Предельные усилия прижатия щеток к контактным кольцам генераторов

Тип автомобиля	Тип генераторной установки	Усилие прижатия щетки, Н
ГАЗ-53А, -5312, -33061	Г250ГЗ, Г250ДЗ, 3812.3701	1.8 - 2,6
ЗИЛ-130, -53014, -4319	Г250И1, 17.3701, 3872.3701	1,8 - 2,6
Все модели ВАЗ, ГАЗ-3110	37.3701, 94.3701	4,0 - 4,4

Биение контактных колец и сердечника измерять относительно посадочных поверхностей подшипников оси вала [4] как показано на рисунке 4.9. Диаметр контактных колец можно определить штангенциркулем. При неравномерном износе контактных колец допускается проточка до размера не менее минимально допустимого диаметра [4].

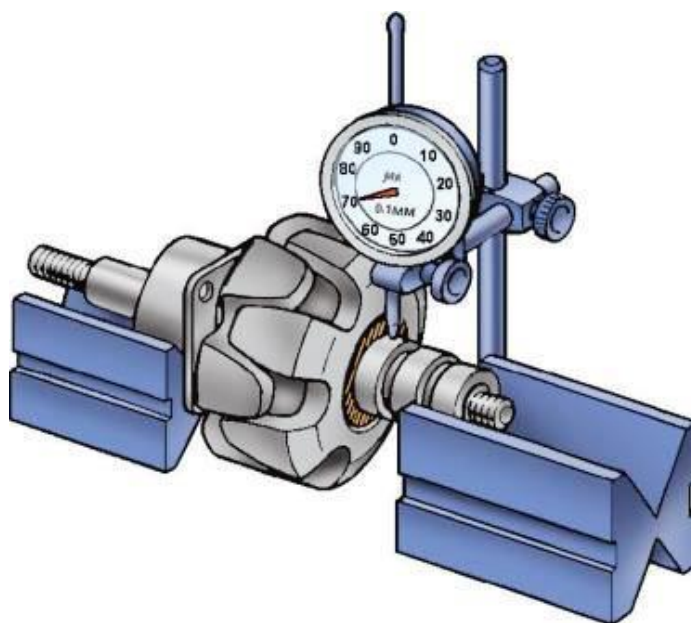


Рисунок 4.9 – Определение биения контактных колец генератора

К недостаткам прямых методов следует отнести необходимость снятия генератора с автомобиля, а также частичной или полной разборки генератора и высокую трудоемкость. Согласно [2] время на снятие генератора автомобилей ВАЗ составляет 0,41 нормо-часа без учета затрат на диагностирование элементов генератора. Плотная компоновка подкапотного пространства приводит к увеличению трудоемкости снятия генератора. На автомобилях LADA Granta [39] для доступа к генератору необходимо демонтировать правое переднее колесо и брызговик двигателя, что увеличивает норму времени до 0,89 нормо-часа. Разборка генератора вместе с процедурами прямого диагностирования занимает 2,00 нормо-часа [3].

Еще одним недостатком прямых методов диагностирования является то, что по окончании работ требуется проведение стендовых испытаний генератора, поскольку только проверка соответствия выходных параметров техническим нормативам позволяет устанавливать генератор обратно на автомобиль.

§3 Субъективные методы диагностирования

В основе субъективных методов лежат способы определения технического состояния автомобиля по выходным параметрам динамических процессов. Однако получение, анализ информации, а также принятие решения о техническом состоянии производятся с помощью органов чувств оператора, что имеет достаточно высокую погрешность.

Наибольшее распространение получили следующие субъективные методы:

- визуальный;
- прослушивание работы механизма (аудиальный);
- ощупывание механизма (тактильный).

Визуальный метод дает возможность обнаружить, например, следующие неисправности: трещины и износ приводного ремня (рисунок 4.10), подгорание, растрескивание и осыпание изоляции обмоток и пазовой изоляции, электроэрозию меди проводов.

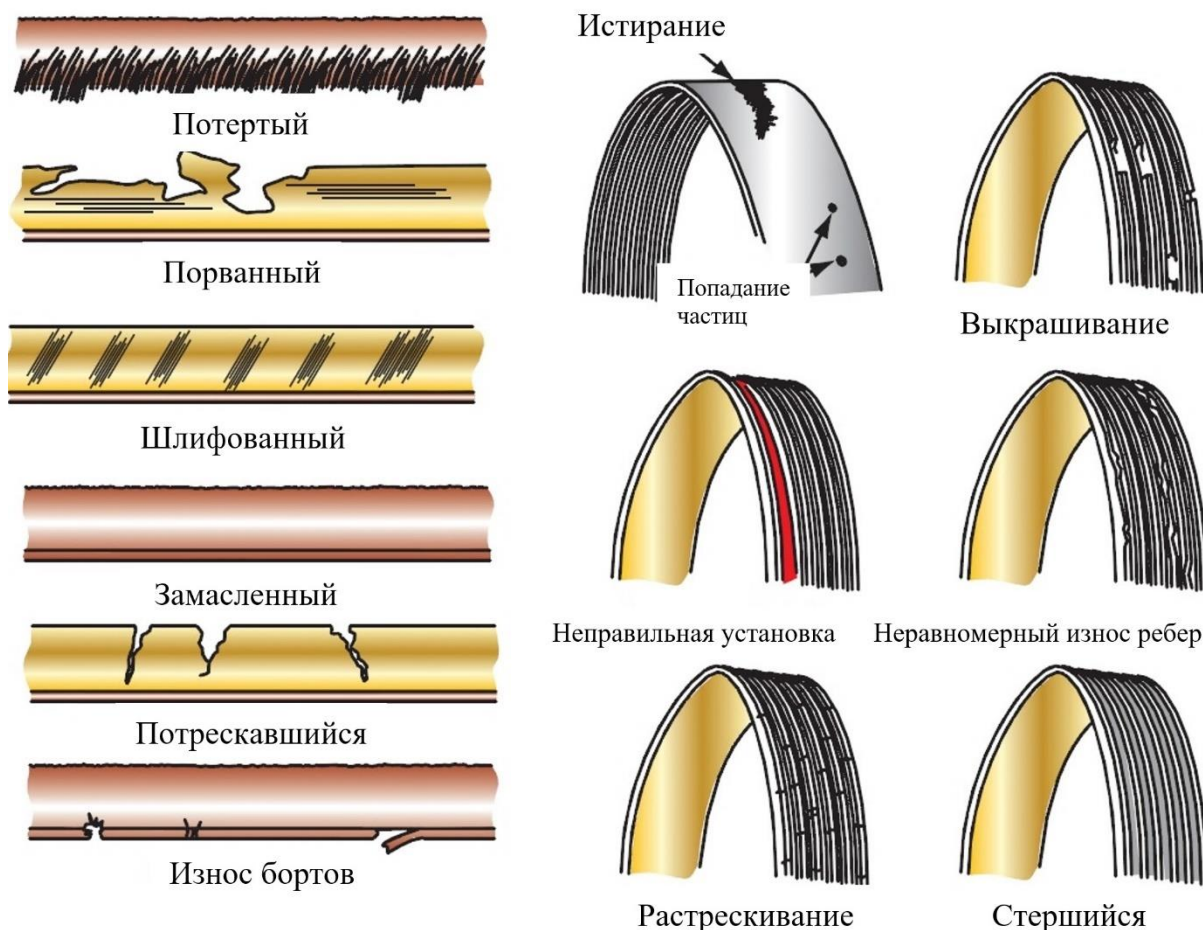


Рисунок 4.10 – Неисправности приводного ремня генератора

В руководствах по эксплуатации транспортных средств оценку состояния автомобильных генераторов предлагается проводить с помощью средств приборной панели автомобиля (амперметра, вольтметра – в устаревших моделях, или контрольной лампы). Контрольная лампа позволяет выявить лишь одну из неисправностей генераторной установки – обрыв обмотки ротора, то есть несет сообщение «Генератор неисправен».

Шумы автомобильного генератора могут возникать по трем причинам, определяющим тип шума. Свистящий шум возникает по причине

ослабления натяжения приводного ремня, либо по причине неисправности подшипников генератора.

Воющий шум может быть вызван закороченными диодами, замыканиями статорной обмотки, или сухим подшипником ротора.

Быстрый способ диагностирования воющего шума состоит в разрыве электрического соединения генератора с бортовой сетью. Если после запуска двигателя причина шума исчезла, значит он имел электрическое происхождение. В противном случае – причина механическая, вероятно, изношенные подшипники.

Методом ощупывания генератора можно определить такие неисправности:

- избыточное или недостаточное натяжение ремня генератора, не оборудованного автоматическим натяжным устройством;
- ослабление крепления генератора и проводов – по относительному перемещению деталей;
- межвитковые и короткие замыкания обмоток статора и ротора – по чрезмерному нагреву поверхности генератора.

На большинстве легковых автомобилей натяжение ремня должно быть таким, чтобы прогиб наибольшей ветви при сильном нажатии большим пальцем составлял 10 мм [41].

§4 Объективные методы диагностирования

Объективные методы позволяют не разбирать генератор, проводить контроль с меньшими затратами труда и оперативно получать результаты измерения. К недостаткам косвенных методов относятся сложность диагностического оборудования, значительная стоимость самого оборудования и контроля, необходимость высокой квалификации персонала.

Определяемые косвенными методами диагностические параметры принято разделять на три группы:

1. Параметры рабочих процессов. Для автомобильного генератора ими являются сила тока и напряжение.
2. Параметры сопутствующих процессов. Сюда можно отнести создаваемые в процессе работы шум, вибрацию, тепловую и электромагнитную энергию.
3. Геометрические величины. Работа генератора напрямую зависит от усилия натяжения (величины прогиба) приводного ремня.

Общая характеристика косвенных методов диагностирования автомобильных генераторов приведена в таблице 4.4.

Параметры рабочих процессов

Оценка технического состояния, проводимая с помощью мультиметра (для измерения величины выходного напряжения) и прибора для проверки натяжения приводного ремня позволяет определить часть неисправностей, на конечной стадии вызывающих снижение/увеличение напряжения. Выявить конкретную причину неисправности данным методом, как правило, невозможно. Однако простота метода и отсутствие сложного диагностического оборудования привело к широкому его применению на практике.

Одним из распространенных способов диагностирования генераторов, снятых с двигателя (прописан в руководствах по техническому обслуживанию автомобилей ВАЗ [3]) является проверка на специализированных стендах (рисунок 4.11). Этот способ предполагает проверку выходного напряжения и силы тока генератора при вращении его ротора с определенной скоростью.

Таблица 4.4 – Объективные методы диагностирования
автомобильных генераторов

Диагностируемые параметры	Диагностические средства	Достоинства	Недостатки
Напряженность внешнего магнитного поля	Датчики магнитного поля	Возможность определения ранней стадии неисправностей	Сложность интерпретации результатов диагностирования
Температура поверхности генератора	Тепловизор, термоиндикаторы	Возможность определения ранней стадии неисправностей	Необходимость выдержки времени
Виброускорение	Датчики ускорения	-	Сложность интерпретации результатов диагностирования
Коды неисправностей	Сканер кодов неисправностей	Простота	Невозможность определения конкретных неисправностей
Сила тока, напряжение, токоскоростная характеристика	Специализированный стенд	Возможность определения ранней стадии неисправностей	Необходимость снятия с автомобиля, низкая оперативность, высокая трудоемкость (до 1 чел-ч)
Амплитудно-частотная характеристика выходного напряжения	Осциллограф	Оперативность, точность, возможность автоматизации, низкая трудоемкость (0,25 чел-ч)	Необходимо наличие осциллографа, методики обработки результатов



Рисунок 4.11 – Стенд для проверки стартеров и генераторов Э250М-02

При проверке в режиме холостого хода определяется частота вращения ротора, при которой генератор начинает вырабатывать номинальное напряжение (начальная частота вращения – n_0). Если данная частота меньше или равна паспортному значению, генератор проверяют под нагрузкой.

При проверке под нагрузкой определяется частота вращения ротора, при которой генератор создает в нагрузке номинальный ток. Как правило, полученная частота вращения (максимальная – n_{max}) не должна превышать

значения 6000 1/мин. Если испытываемый генератор удовлетворяет данным условиям, он считается исправным.

Графическое изображение зависимости силы тока генератора при изменении частоты вращения ротора при постоянстве выходного напряжения называется токоскоростной характеристикой (рисунок 4.12).

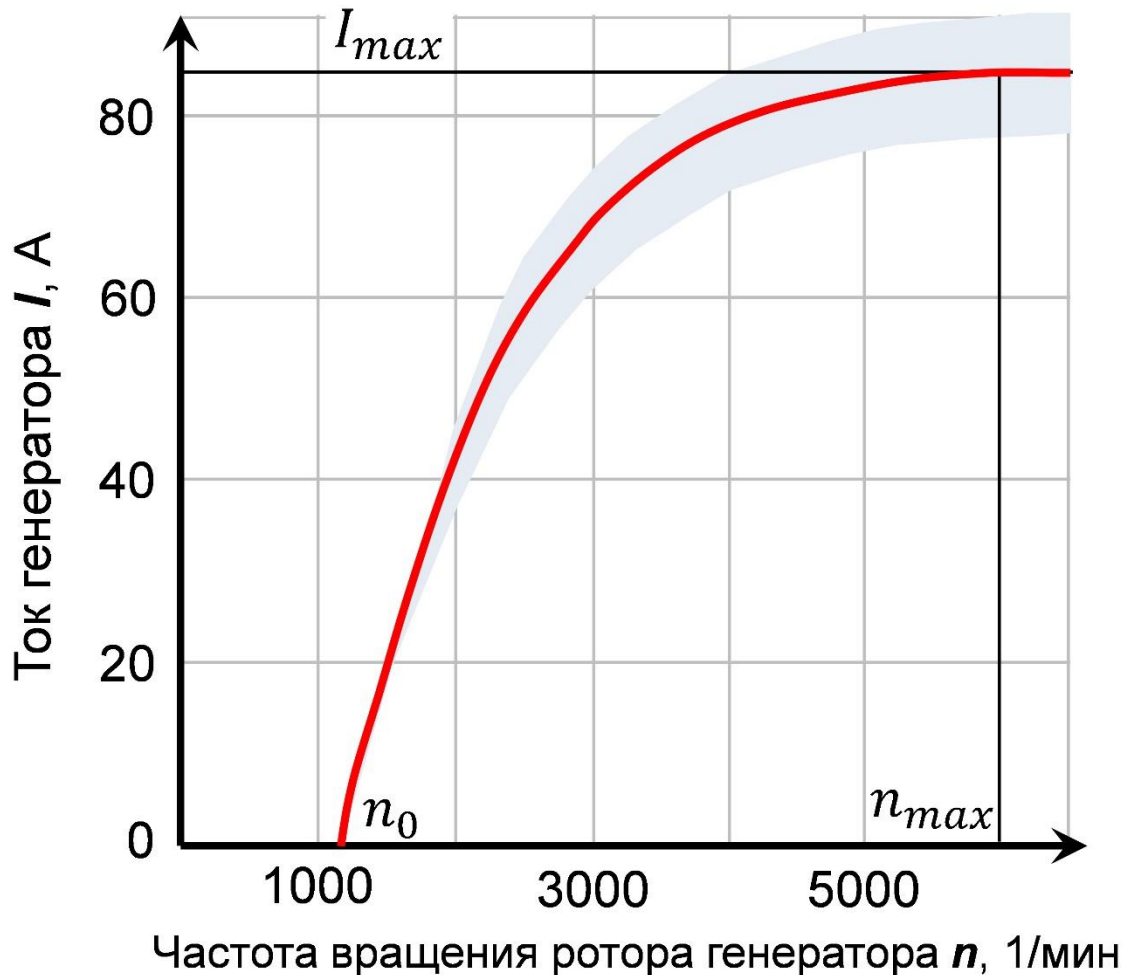


Рисунок 4.12 – Токоскоростная характеристика генератора

В работах [25, 43, 60] предложено определять неисправности генератора на основе сравнения, снятой на стенде токоскоростной характеристики с эталонной. Наличие неисправностей даже ранней стадии развития приведет к уменьшению тока отдачи генератора (рисунок 4.13).

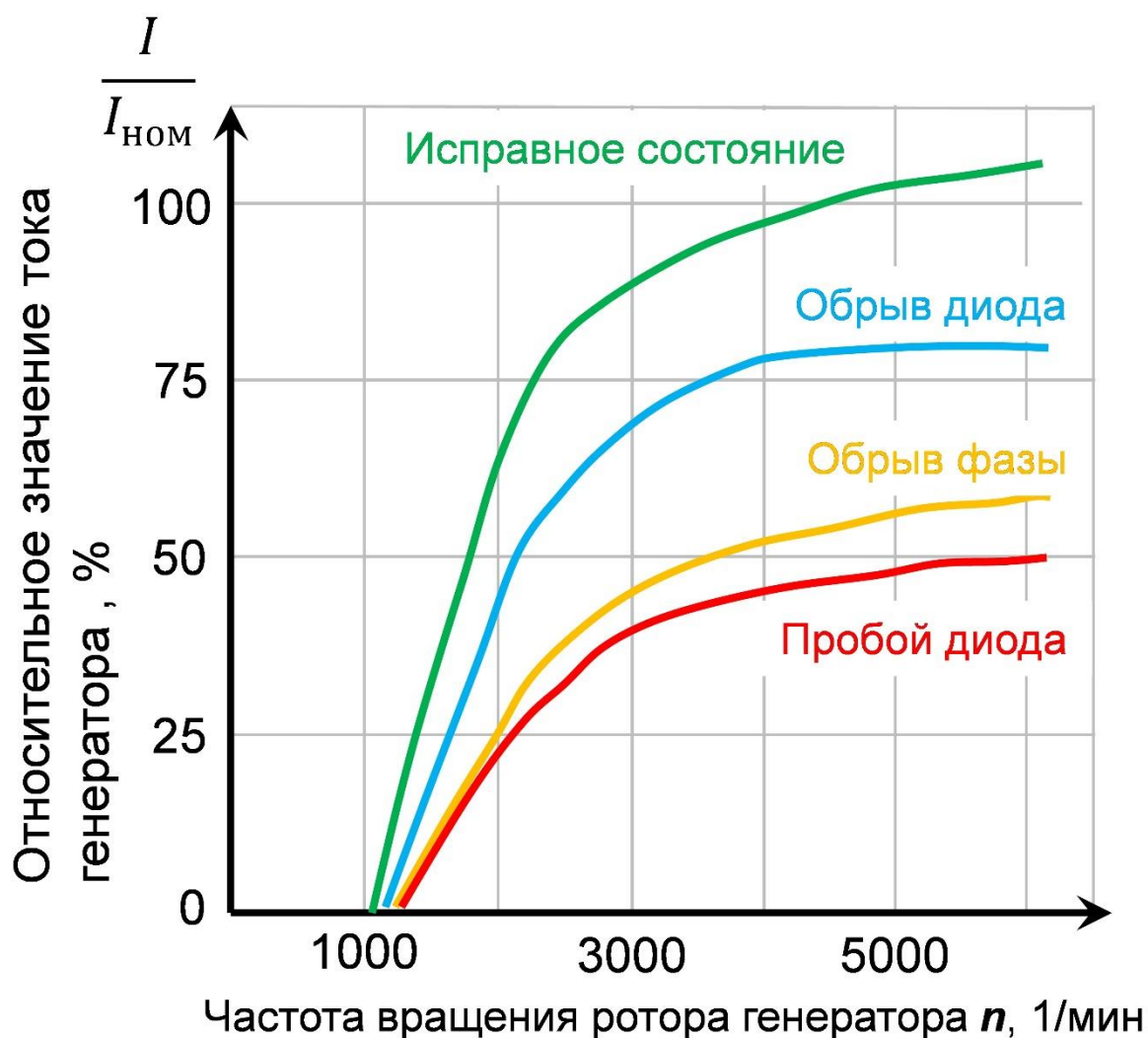


Рисунок 4.13 – Влияние неисправности на токоскоростную характеристику генератора [43]

Существенным недостатком проверки генератора на специализированных стендах является необходимость снятия генератора с транспортного средства и продолжительность диагностирования (не менее 0,25 ч [3]).

Компьютерная диагностика, являющаяся специфической именно для транспортных средств, позволяет диагностировать лишь повышенное и пониженное напряжение бортовой сети (коды ошибок B1049 и B1050 соответственно). Причины же, то есть конкретные неисправности, необходимо диагностировать другими методами. Еще одним недостатком

метода является то, что считывание подобных ошибок возможно лишь на дилерских СТО с применением марочных сканеров.

Осциллографические методы диагностирования предполагают определение формы и параметров осциллограмм выходного напряжения при помощи осциллографа или устройств, его содержащих (например, комплекса автомобильной диагностики).

К достоинствам осциллографических методов можно отнести оперативность, достаточную точность, возможность автоматизации измерения диагностических параметров. Подробное рассмотрение осциллографических методов приведено в параграфе 5 четвертой главы.

Параметры сопутствующих процессов

Электромагнитный метод предполагает оценку напряженности внешнего магнитного поля, то есть поля за пределами генератора. При возникновении дефектов электрического происхождения происходит изменение параметров внешнего магнитного поля.

Измерение параметров внешнего магнитного поля в собственных исследованиях автора (см. Пузаков, А.В. «Совершенствование методики оценки внешнего магнитного поля автомобильного генератора» и другие) выполнено с помощью датчика Холла, преобразующего напряженность магнитного поля в выходное напряжение, поэтому в качестве параметра внешнего магнитного поля будем использовать относительную величину – магнитуду магнитного поля, выраженную в Вольтах.

Изменение магнитуды внешнего магнитного поля во времени для исправного генератора, несмотря на искажения, в общем виде напоминает симметричную синусоиду. Однако магнитуда внешнего магнитного поля зависит от выбора точки измерения на поверхности генератора. Для выбора оптимальной точки были произведены измерения магнитуды внешнего магнитного поля в разных точках поверхности генератора.

Внешнее магнитное поле генератора можно разделить на аксиальную и радиальную составляющие. Радиальная составляющая магнитного поля расположена в плоскости, перпендикулярной оси машины, и представляет собой изображение плотности потока в воздушном зазоре, которая ослабляется магнитной цепью статора. Установлено, что магнитуда магнитного поля в радиальной плоскости незначительно колеблется, достигая экстремумов через каждые 120 градусов (рисунок 4.14).

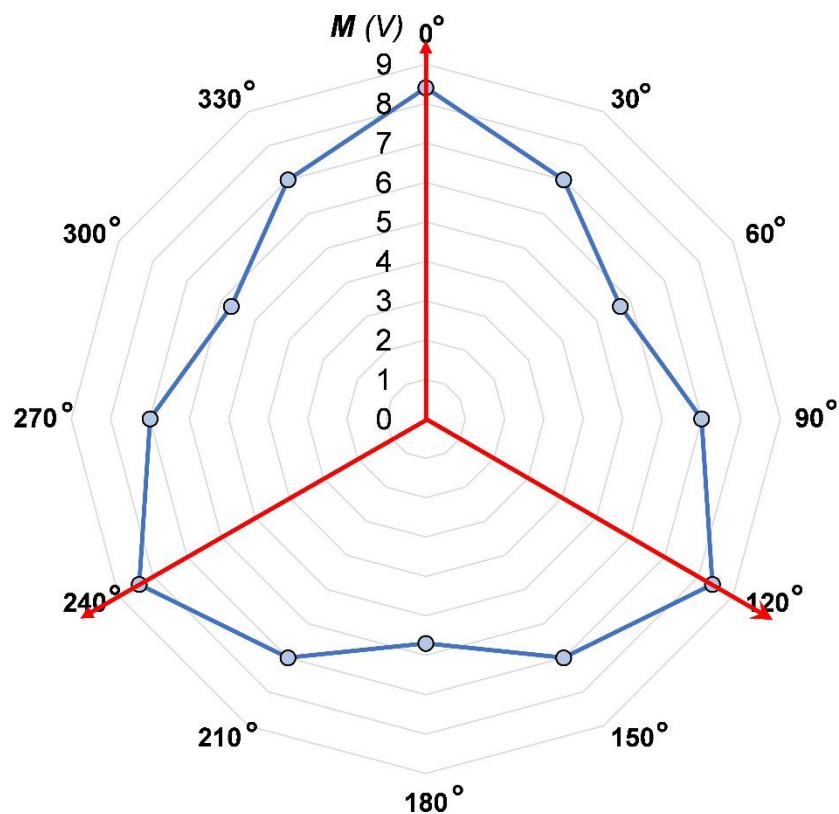


Рисунок 4.14 – Изменение радиальной составляющей внешнего магнитного поля

Распределение магнитуды магнитного поля в плоскости вала ротора показано на рисунке 4.15. Из него видно, что в отличие от радиальной составляющей, магнитуда может изменяться в широком диапазоне (2,12 – 42,6 В). Кроме того, результаты эксперимента показали чувствительность осевой составляющей магнитного поля к электрическим неисправностям генератора.

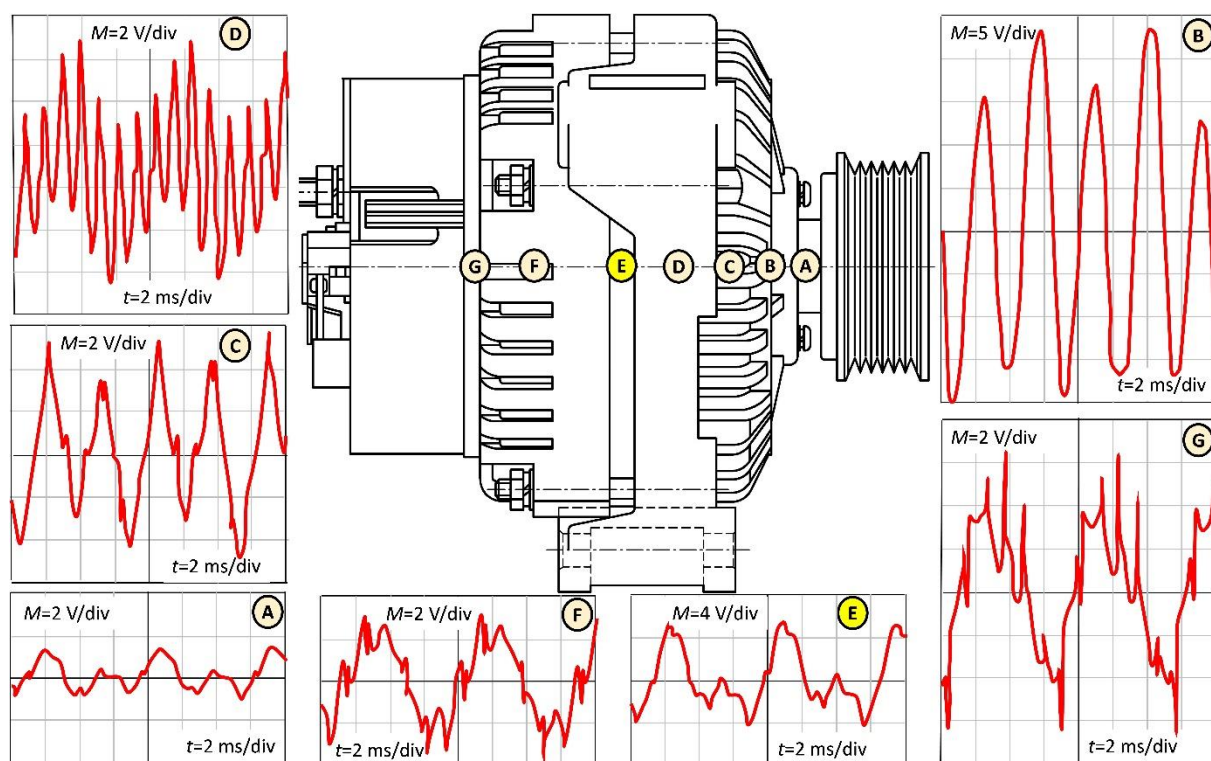


Рисунок 4.15 – Форма и амплитуда осциллограмм внешнего магнитного поля в характерных точках на поверхности генератора

По результатам моделирования неисправностей установлено, что в разных точках поверхности магнитуда внешнего магнитного поля может как увеличиваться, так и уменьшаться относительно исправного генератора, причем в одной и той же точке, например в точке **В**, уменьшение и увеличение магнитуды магнитного поля может соответствовать разным неисправностям, что говорит о неоднозначности данного параметра.

Поэтому окончательно для измерения магнитного поля была выбрана точка **Е**, для которой магнитуда магнитного поля исправного генератора составила 8,4В. и меньшие значения для характерных неисправностей (рисунок 4.16).

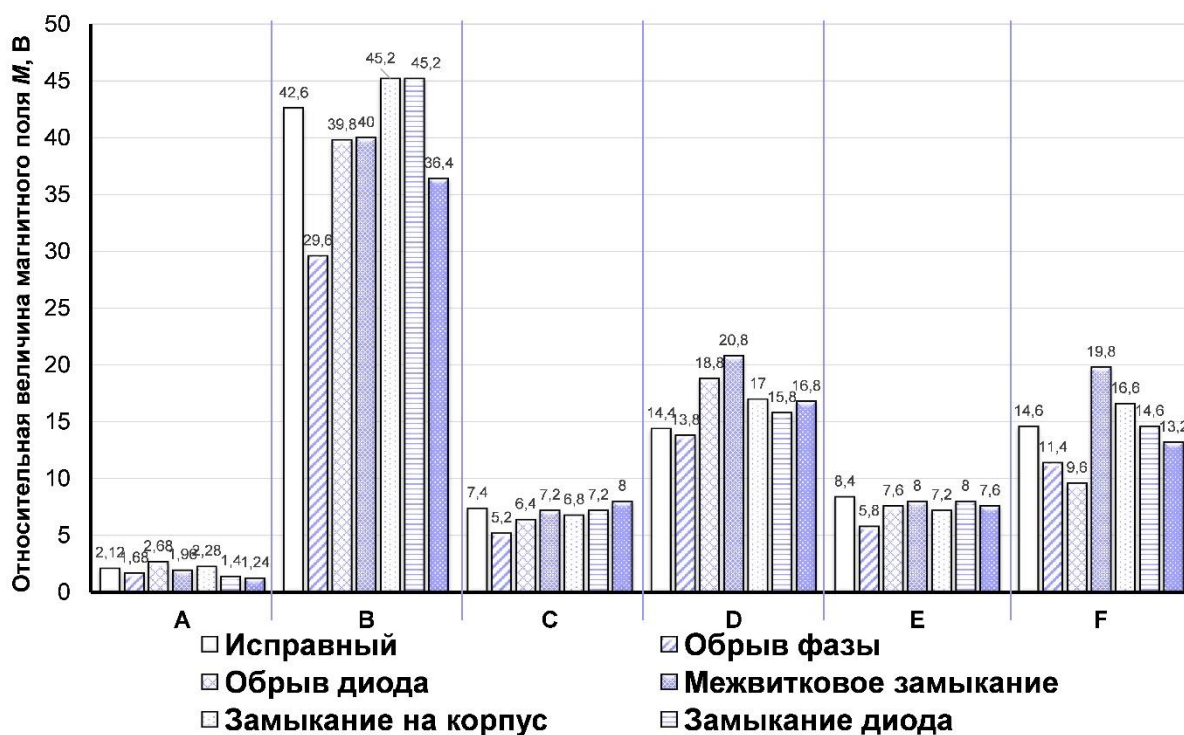


Рисунок 4.16 – Зависимость магнитуды внешнего магнитного поля от технического состояния генератора и выбора точки измерения

Недостатком предлагаемого метода является недостаточная проработанность и сложность интерпретации полученных результатов, так как практическое применение данный метод получил лишь для стационарных машин большой мощности.

Тепловой метод основан на мониторинге и анализе температуры на поверхностях генератора. При возникновении таких аварийных ситуаций, как замыкание фазы статора на корпус, пробое диода выпрямителя и межфазном замыкании происходит значительное выделение тепла в обмотках/выпрямителе которое увеличивает инфракрасное излучение от поверхности генератора.

Несмотря на удобство теплового метода, ему присущи и недостатки. Для получения информации о перегреве необходимо вывести генератор на установившийся тепловой режим. Измерение температуры с помощью распространенных датчиков не позволяет локализовать место наибольшего

перегрева генератора, для этих целей целесообразно применение тепловизора.

Часть исследователей при анализе теплового поля поверхности автомобильного генератора использует тепловизор, который позволяет одновременно измерять температуру поверхности во множестве точек и составлять карту температур поверхности. В работе [86] исследователи проводят анализ теплового поля автомобильного генератора с целью установления взаимосвязи между тепловым состоянием автомобильного генератора и его техническим состоянием. На рисунке 4.17 представлена фотография, сделанная при помощи тепловизора. На ней видны очаги, из которых исходит тепловая энергия, превышения температуры в данных точках составляет более 40°C .

На рисунках 4.18 и 4.19 изображены термограммы собственных исследований автора. Подобные фотографии делались при работе исправного генератора и генератора с характерной неисправностью.

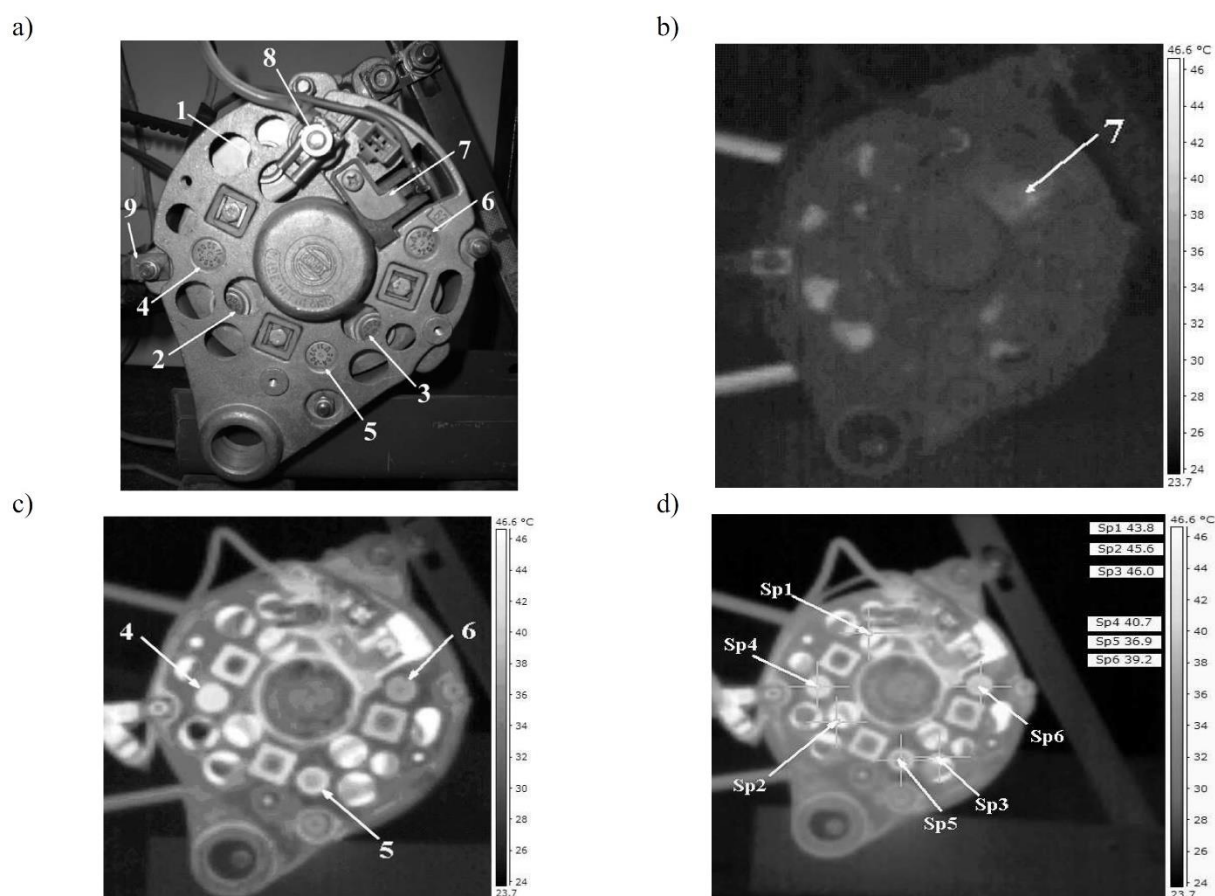


Рисунок 4.17 – Термограммы генератора [86]

На рисунке 4.17 обозначены: а) объект испытаний, б) термограмма с разрывом обмотки возбуждения, с) термограмма с разрывом в одном отрицательном диоде, d) термограмма исправного генератора; 1, 2, 3 - положительные диоды, 4, 5, 6 - отрицательные диоды, 7 - щеткодержатель, 8 - положительная клемма В +, 9 - клемма, Spl-Sp6 - температуры диодов.

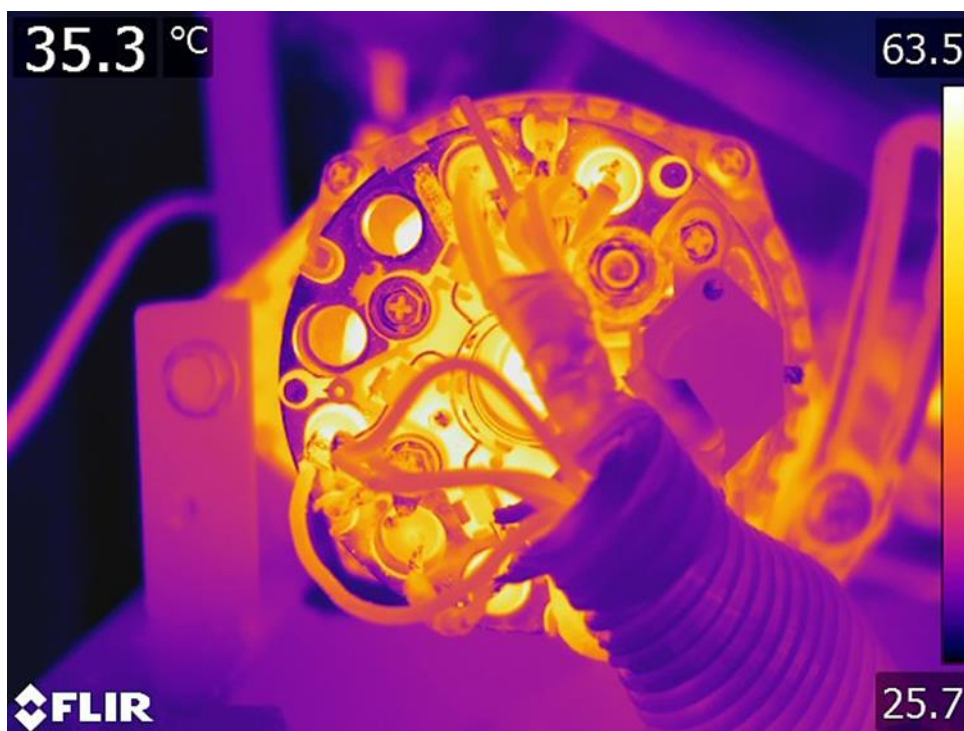


Рисунок 4.18 – Термограмма исправного генератора

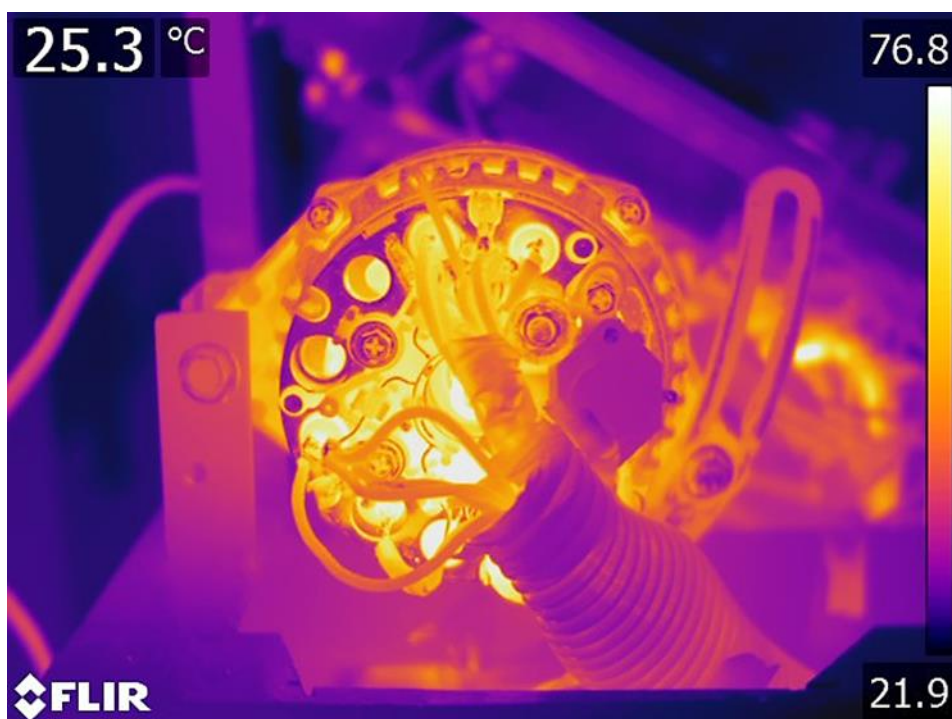
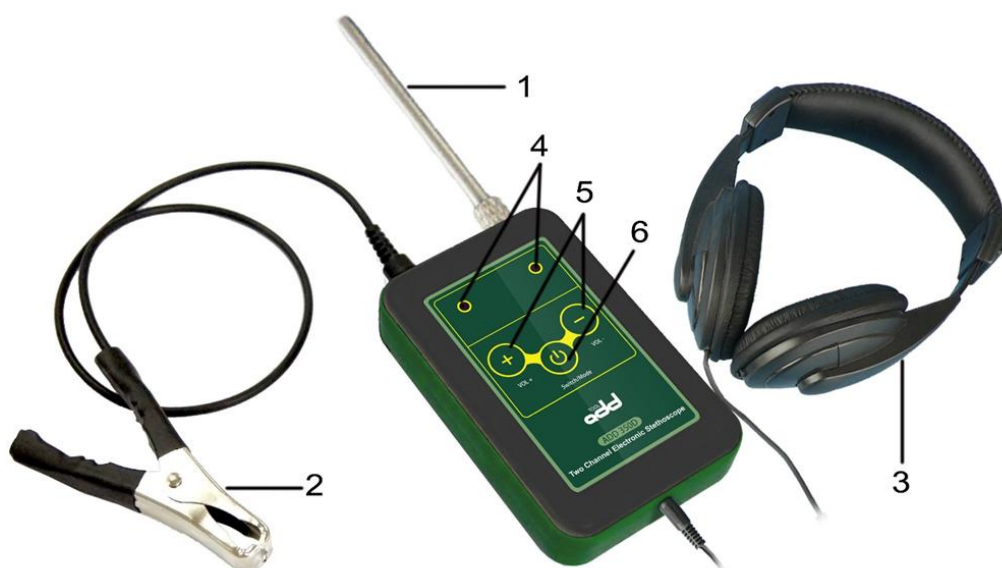


Рисунок 4.19 – Термограмма генератора с межфазным замыканием

Тепловизор является дорогим устройством, и он имеется на станциях технического обслуживания (СТО) далеко не всегда. Поскольку метод применим для большого числа других агрегатов автомобиля (например, трансмиссии), то можно предположить, что в будущем роль этого метода будет увеличиваться и он найдет свое применение и для генераторов.

Акустический метод предполагает выявление места с повышенным уровнем шума при помощи стетоскопа. Шумы автомобильного генератора могут возникать по трем причинам, определяющим тип шума. Свистящий шум возникает по причине ослабления натяжения приводного ремня, либо по причине неисправности подшипников генератора. Чтобы протестировать подшипник на предмет источника возникновения шума используют металлический стержень, конец которого помещают непосредственно вблизи подшипников (рисунок 4.20).



1 – металлический длинный зонд для измерений, 2 – зажимной индуктивный датчик, 3 – наушники, 4 – индикаторы каналов, 5 – регулировка громкости звука каналов, 6 – кнопка включения/выключения прибора.

Рисунок 4.20 – Автомобильный электронный стетоскоп

Воющий шум может быть вызван закороченными диодами, замыканиями статорной обмотки, или сухим подшипником ротора.

Быстрый способ диагностирования воющего шума состоит в разрыве электрического соединения генератора с бортовой сетью. Если после запуска двигателя причина шума исчезла, значит он имел электрическое происхождение. В противном случае – причина механическая, вероятно, изношенные подшипники.

Недостатком данного способа является весьма ограниченное число диагностируемых неисправностей.

Виброакустический метод дает возможность определения источника вибрации, возникающей от взаимного соударения деталей диагностируемых агрегатов. Метод нашел широкое применение при диагностике состояния подшипников стационарных электрических машин. Задачей виброакустического диагностирования является подавление помех, выделение из общего спектра полезных сигналов и определение с их помощью технического состояния агрегата.

В работе [57] производится сравнение спектров вибрации нового генератора, генератора с наработкой и отказавшего генератора (рисунки 4.21 и 4.22). На рисунках можно увидеть четкий пик на частоте паза статора (36X) во всех случаях и то, что пики 36X достаточно близки по величине. Было установлено, что величина пика уменьшается с увеличением наработки генератора. Неисправный генератор не имеет гармоник 36X.

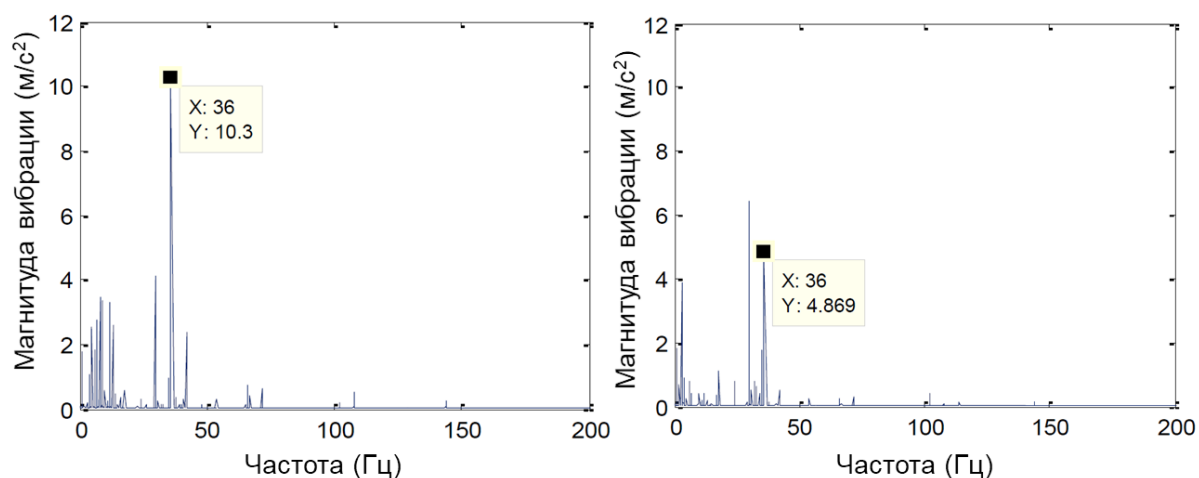


Рисунок 4.21 – Спектр вибрации нового генератора (слева) и генератора с наработкой [57]

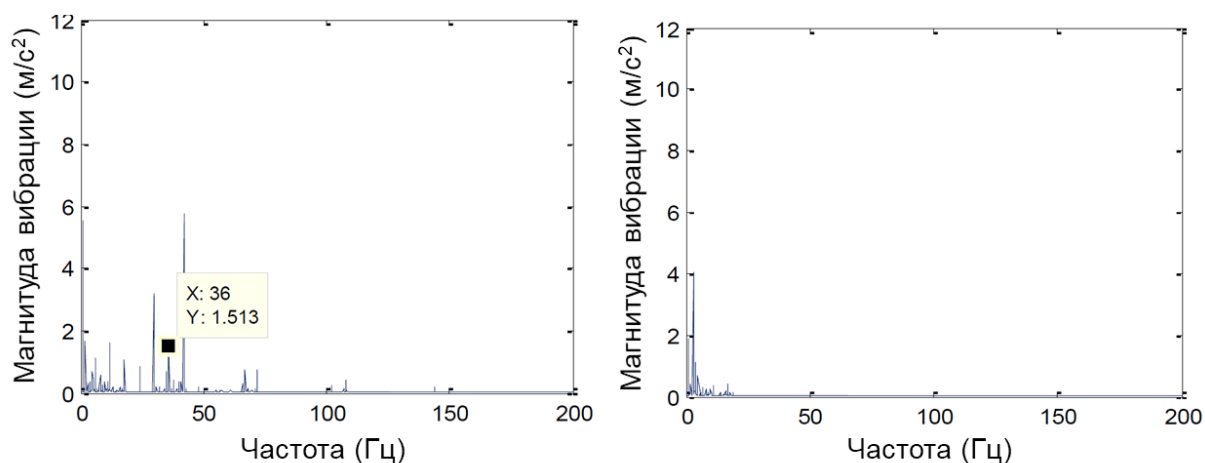


Рисунок 4.22 – Спектр генератора с частичной неисправностью (слева) и неисправного генератора [57]

Собственные вибрации, возникающие в процессе работы автомобильного генератора складываются с вибрациями двигателя внутреннего сгорания, агрегатов трансмиссии, вентилятора системы охлаждения, кондиционера и т. д. образуя сложное пространство виброускорений [47]. Выделить в этом пространстве вибрации генератора является непростой задачей. К тому же этот метод, как и предыдущий, позволяет диагностировать лишь некоторые неисправности генератора.

Автор работы [59] предлагает диагностировать генератор при помощи анализа электрических импульсов, полученных при пропускании электрического тока через корпус подшипников. Автором отмечается, что неисправность подшипников является наиболее распространённым механическим отказом при работе генератора. Он предлагает свой метод как альтернативу вибрационным методам, исключая необходимость установки дорогостоящих датчиков вибрации.

Основной задачей экспериментальных исследований являлось получение данных об эффективности предлагаемого метода, и сравнение его с существующим – вибрационным. Исследователем были осуществлены эксперименты по диагностированию состояния подшипников этими двумя способами. На рисунке 4.23 представлены графики, полученные при

анализе результатов данных экспериментов. Для оценки состояния подшипника использовался относительный параметр, характеризующий степень износа поверхностей трения.

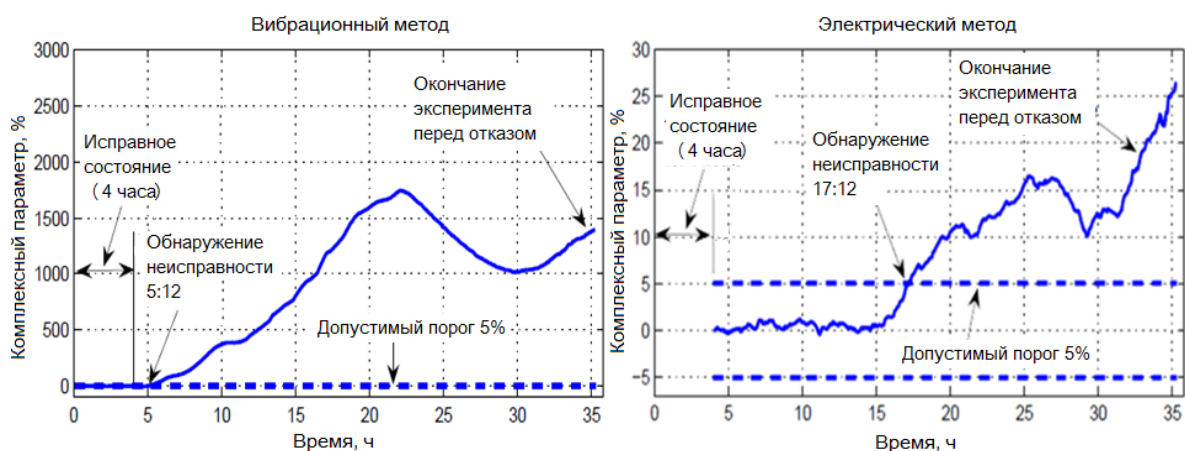


Рисунок 4.23 – График изменения относительного параметра с течением времени [59]

По графикам видно, что вибрационный метод позволяет определить наличие неисправности намного раньше, чем электрический. Вибрационным методом наличие признаков неисправности было установлено через 5 часов 12 минут после начала эксперимента, а электрическим только через 17 часов 12 минут. Однако оба метода установили наличие неисправности задолго до наступления критического состояния и отказа. Соответственно, предлагаемый автором метод, ввиду отсутствия необходимости установки сложного и чувствительного оборудования, имеет преимущество перед существующими аналогами.

Похожее решение проблемы диагностирования подшипников автомобильного генератора предлагается Селиховым А. В. в работе «Повышение эффективности диагностирования технического состояния генератора автомобиля электрорезистивным методом» [40]. В отличие от вышеописанной работы, автор предлагает производить диагностирование подшипников, путем анализа сигнала тока, пропускаемого через поверхности элементов подшипника, между которыми возникает трение.

В начале проведения экспериментальных исследований автором была разработана многофакторная модель работы подшипников качения. Основным параметром, для которого устанавливалась зависимость значения от внешних и внутренних факторов, являлся параметр электрическое сопротивление подшипника. Основными факторами, рассматриваемыми автором, являлись шероховатость поверхностей трения и условия работы генератора. На рисунке 4.24 представлены графики изменения сопротивления узла трения.

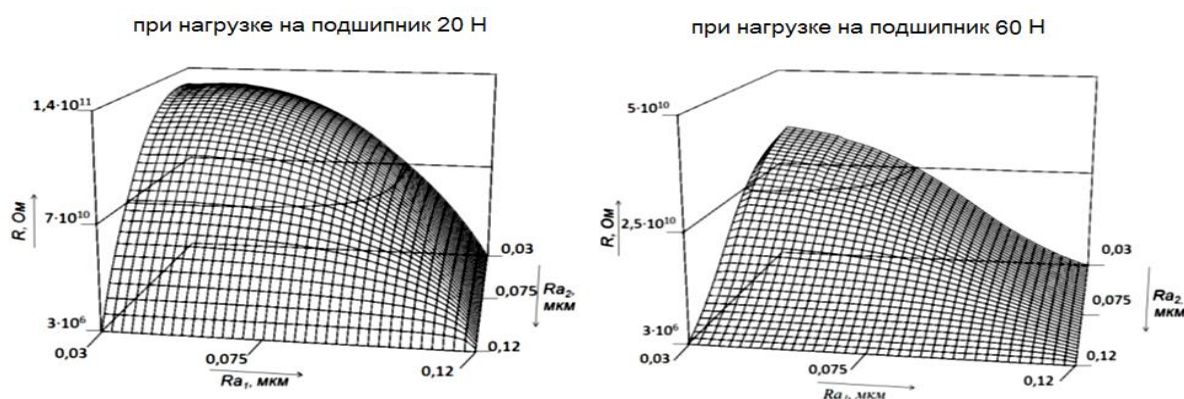


Рисунок 4.24 – График изменения сопротивления узла трения [40]

Для того, чтобы характеризовать техническое состояние подшипников, автором был введен параметр – нормированное интегральное время (НИВ). Его значение зависит в первую очередь от сопротивления в местах трения подшипников. На рисунке 4.25 представлены графики, на которых отображены НИВ при исправном техническом состоянии и при наличии абразива в подшипниках.

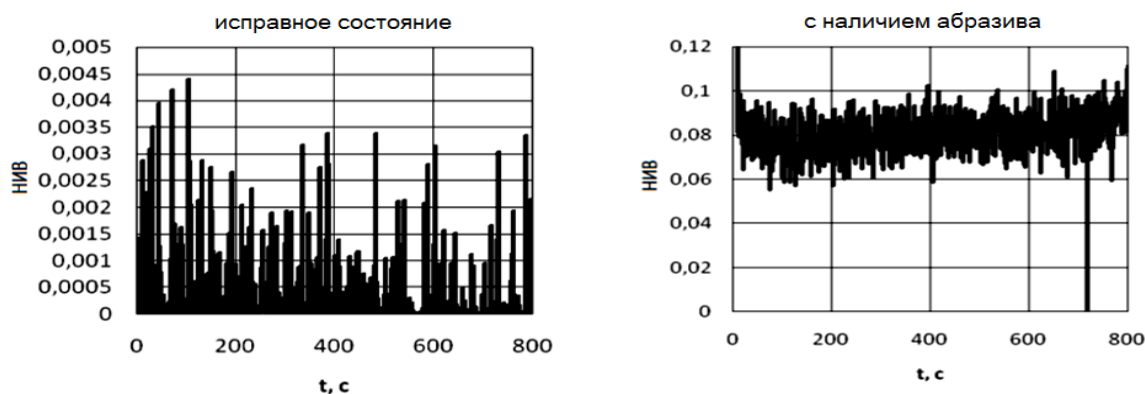


Рисунок 4.25 – График значений НИВ при рабочем режиме [40]

Одним из основных результатов экспериментальных исследований автор называет возможность при помощи его метода определения того, какой конкретно подшипник вышел из строя. Для проверки работоспособности метода при помощи инвертирующего усилителя на подшипники подавались синфазные, различные по знаку, электрические сигналы. На рисунке 4.26 представлены графики изменения этих сигналов со временем.

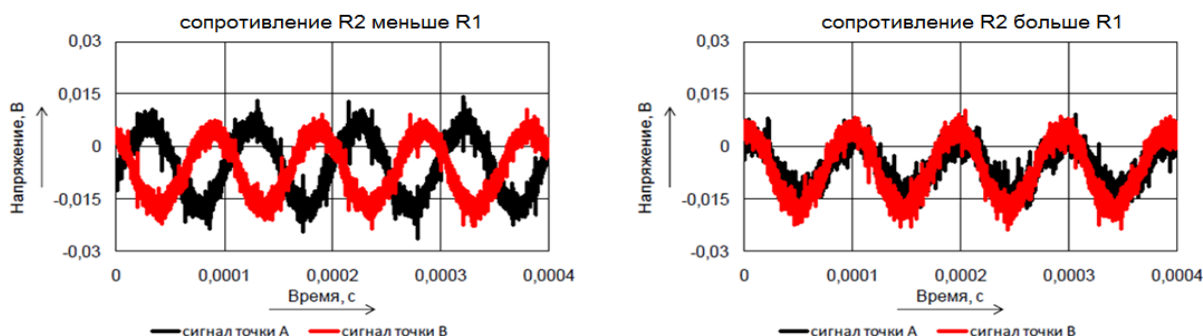


Рисунок 4.26 – Графики электрических сигналов [40]

Автором утверждается, что предлагаемый им метод диагностирования технического состояния подшипников генератора на основе оценки сигнала сопротивления поверхностей трения обладает преимуществами по сравнению с существующими методами. Он обладает малой инерционностью, так как не ведется оценка параметров механических колебаний, а также информативен в широком диапазоне изменения параметров работы генератора.

Данные методы обладают рядом преимуществ, среди которых простота применения на практике, отсутствие необходимости использовать сложное диагностическое оборудование. Однако они позволят обнаружить лишь механические неисправности, возникшие при работе подшипников. Но генератор является элементом электрооборудования автомобиля, и, большая часть отказов, возникающих при его работе, носят электрический характер.

Структурные параметры

На рисунке 4.27 приведен анализ существующих методов определения натяжения приводных ремней [11].

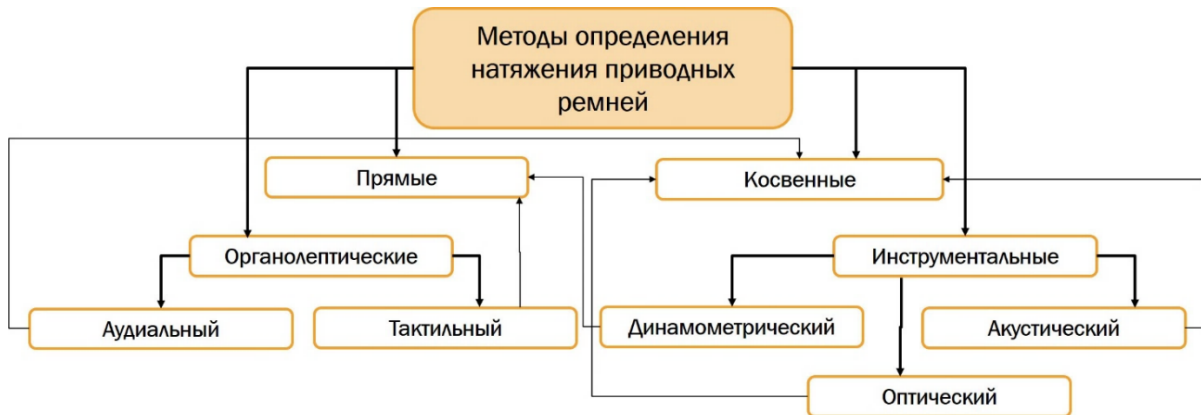


Рисунок 4.27 – Методы определения натяжения приводных ремней

Инструментальные методы позволяют установить точную величину прогиба или натяжения приводного ремня, однако требуют применения специального оборудования. В зависимости от типа оборудования различают динамометрический, акустический и оптический методы.

При динамометрическом методе используются приборы, конструкция которых позволяет создавать нормированное усилие (динамометр) и определять возникающий при измерении прогиб (рисунок 4.28, а). Недостатком подобных приборов можно считать необходимость открытого доступа к приводному ремню и достаточную длину ветви, на которой производится измерение.

Акустический и оптический методы объединяет то, что натяжение ремня измеряется в Герцах. Разница заключается в принципе действия датчика. В акустическом способе это обычный микрофон, сигнал на который поступает при возбуждении колебаний ремня, в оптическом – эти колебания распознает оптический датчик. Кроме того, при прочих равных условиях приборы, использующие оптический метод измерения существенно дороже акустических.



а) динамометрический, б) оптический, в) акустический

Рисунок 4.28 – Приборы для измерения натяжения приводных ремней

Недостатком этих методов является то, что не всегда возможно узнать заводскую характеристику натяжения ремня в герцах (Гц), особенно для импортных автомобилей.

§5 Осциллографические методы диагностирования

Патентный обзор

Известен способ диагностирования изделий электрооборудования автомобилей (RU 2422840) [35], заключающийся в измерении мгновенных значений тока в течение переходного процесса при подаче серии прямоугольных импульсов на изделие автомобильного электрооборудования. Недостатком указанного способа является необходимость изоляции испытуемого изделия от остального электрооборудования (то есть фактические, снятие его с автомобиля) и сложность определения технического состояния ввиду громоздких математических вычислений.

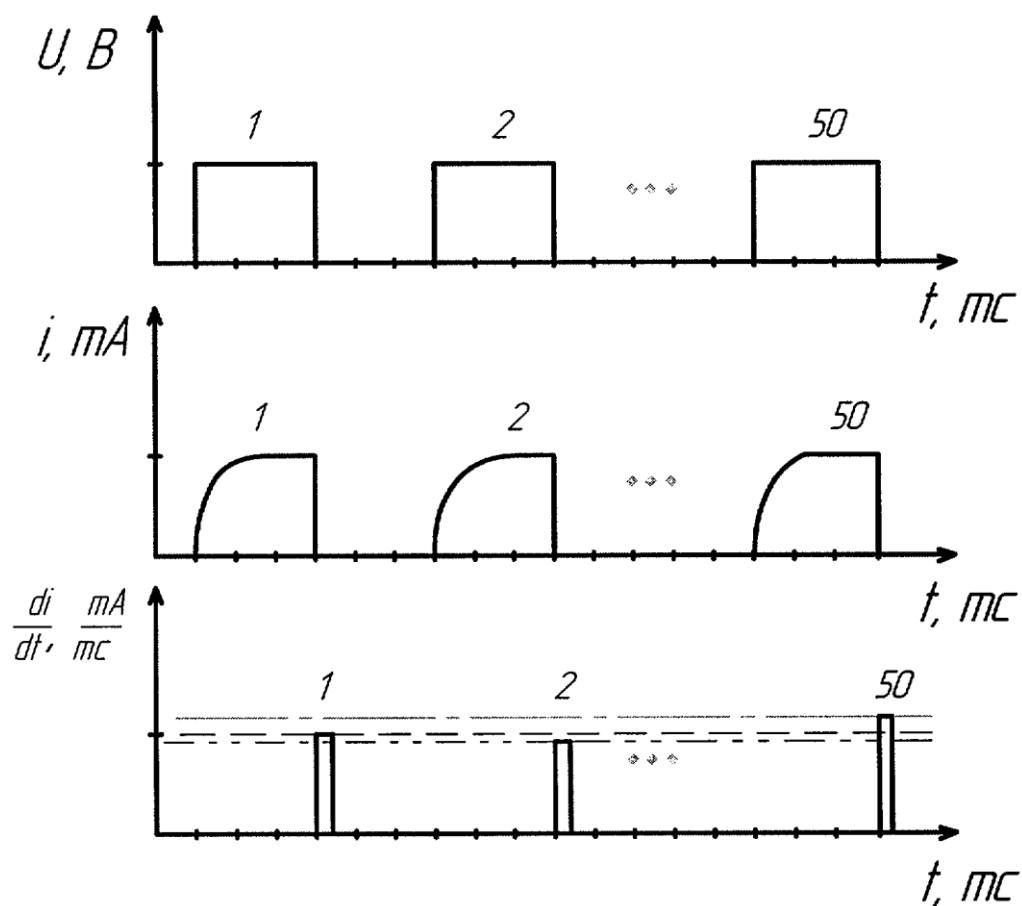


Рисунок 4.29 – Осциллограмма формируемых генератором импульсов [35]

Известен способ диагностирования генераторов переменного тока и устройство для его осуществления (RU 2077064) [34], в котором для определения технического состояния генератора и вида неисправности на обмотку возбуждения подается переменное напряжение и осуществляется осциллографическое наблюдение выходного сигнала с генератора и его сравнение с эталонным сигналом с помощью фигуры Лиссажу. Однако, указанный способ предполагает снятие генератора с автомобиля и проведение тестовых воздействий с применением технически сложного устройства.

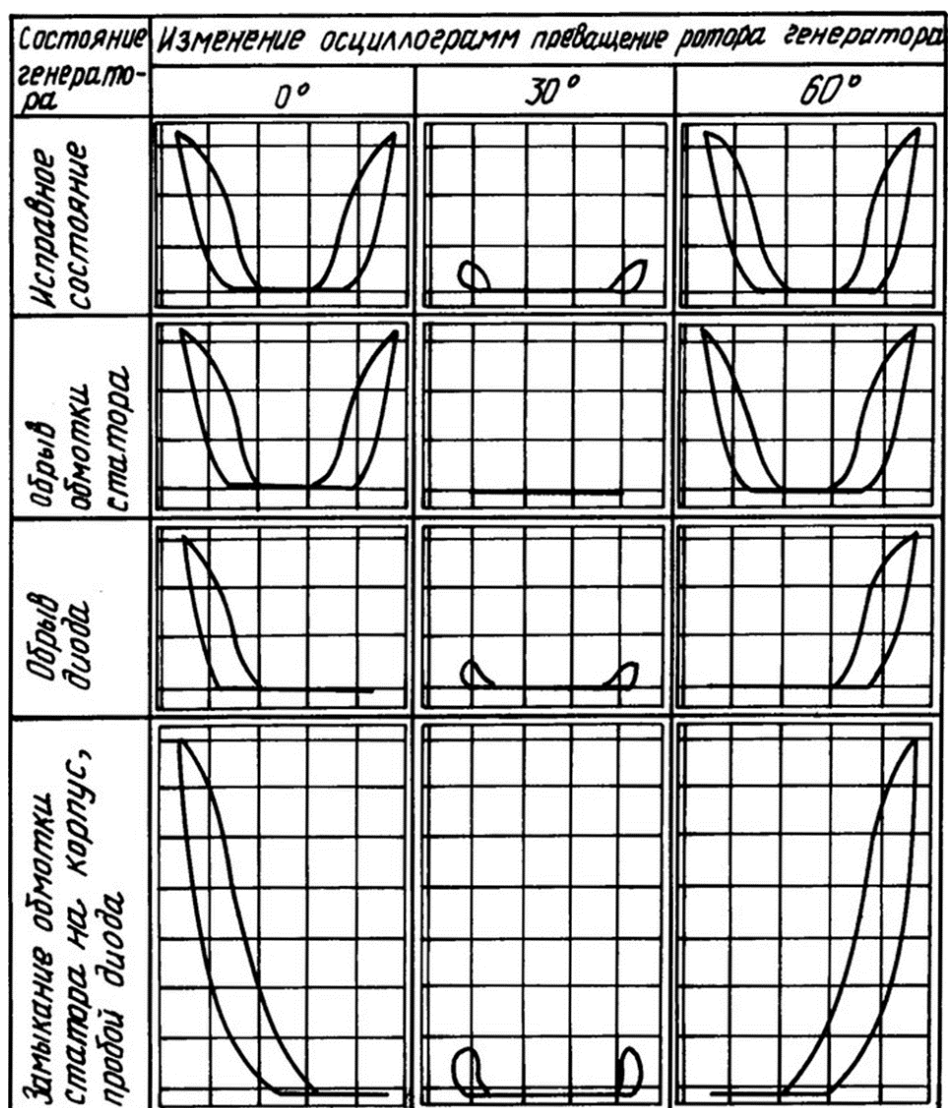


Рисунок 4.30 – Формы фигур Лиссажу, характерные для различных состояний генератора [34]

Известен метод и устройство для диагностирования автомобильного генератора переменного тока (US 4178546) [75], в котором определение неисправности одного или нескольких диодов основывается на измерении частоты гармоник посредством фильтрации выпрямленного напряжения. Недостатком подобного способа является конструктивная сложность устройства, а также возможность определения неисправностей только выпрямительного блока автомобильного вентильного генератора.

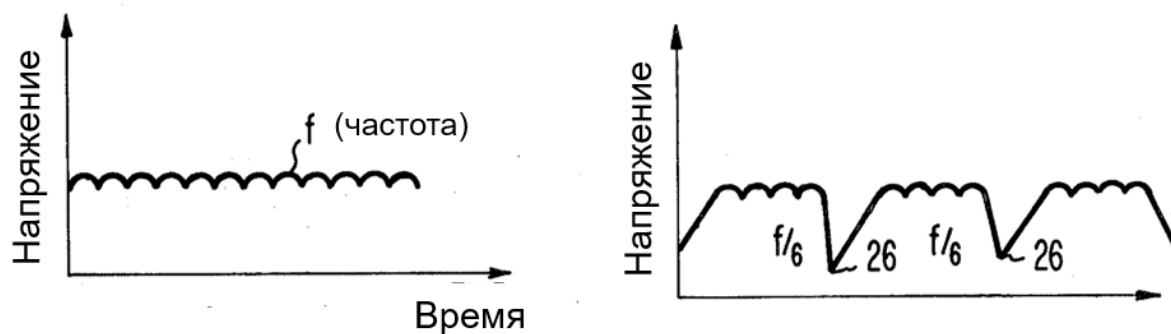


Рисунок 4.31 – Форма осциллограммы для исправного и неисправного генератора [75]

Известен способ и устройство для диагностирования технического состояния автомобильного генератора путем оценки пульсаций выходного напряжения (US 4315204) [76], в котором устройство получает информацию с вольтметра, определяет размах пульсаций и их амплитуды, с датчика положения коленчатого вала определяет частоту вращения ротора генератора, а также определяет значение силы тока в обмотке возбуждения.

Далее аналитическое устройство сравнивает значения параметров работы узла с эталонными для данных условий, которые характеризуют исправное техническое состояние. Наличие отклонение и величина того отклонения говорит о возникновении неисправности. Данное устройство требует наличие вычислительного устройства, а также серьезного программного обеспечения для проведения диагностики.

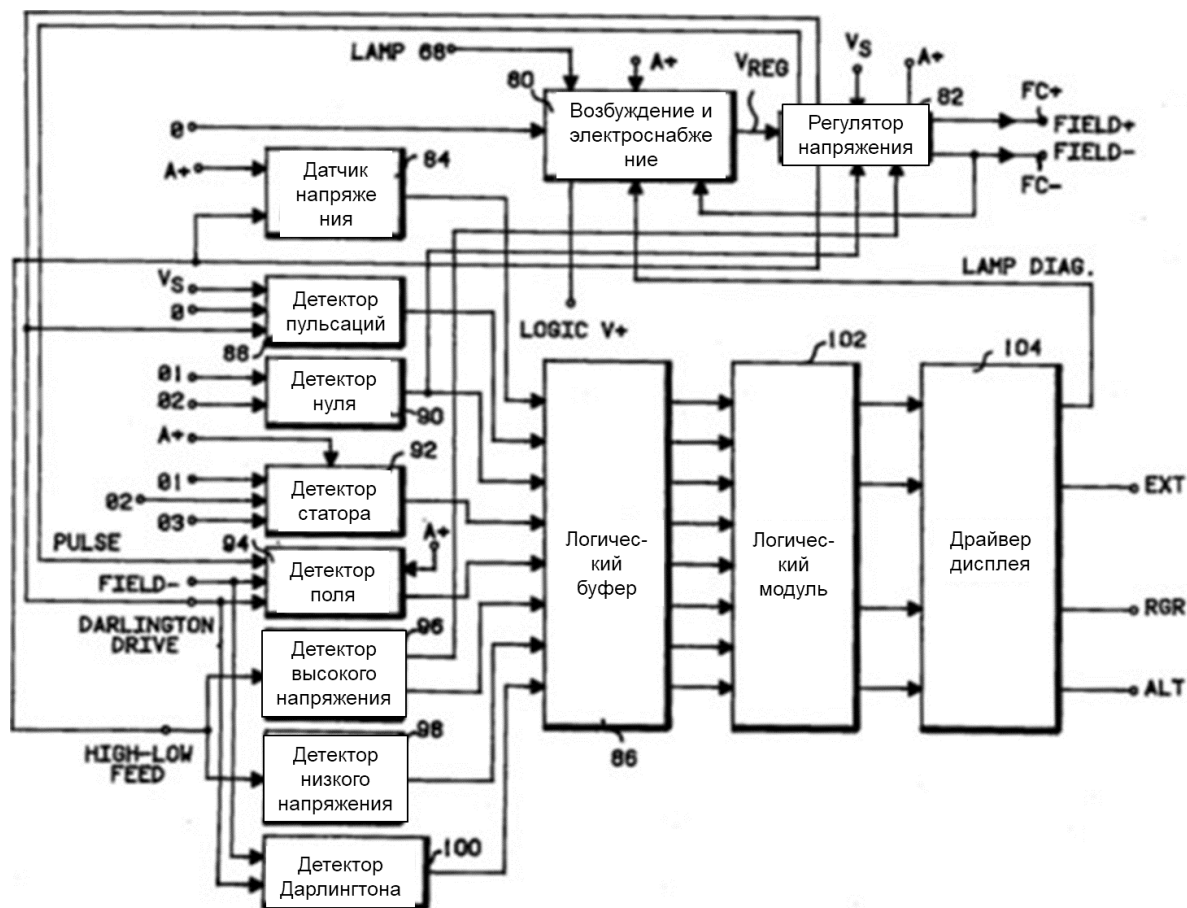


Рисунок 4.32 – Схема регистратора пульсаций генератора [76]

Известно устройство для диагностирования автомобильного генератора на основе оценки вибраций узла (US 6363303) [79]. Устройство включает в себя датчик, измеряющий вибрации генератора, которые вызываются различными неисправностями (отказ одной из фаз, повреждение подшипников). Датчик устанавливается в определенном месте подкапотного пространства автомобиля. При анализе данных о вибрациях, связанных с работой генератора, определяется техническое состояние узла. Недостаток данного метода состоит в сложности идентификации конкретных неисправностей и фильтрации вибраций, которые вызваны не испытуемым генератором.

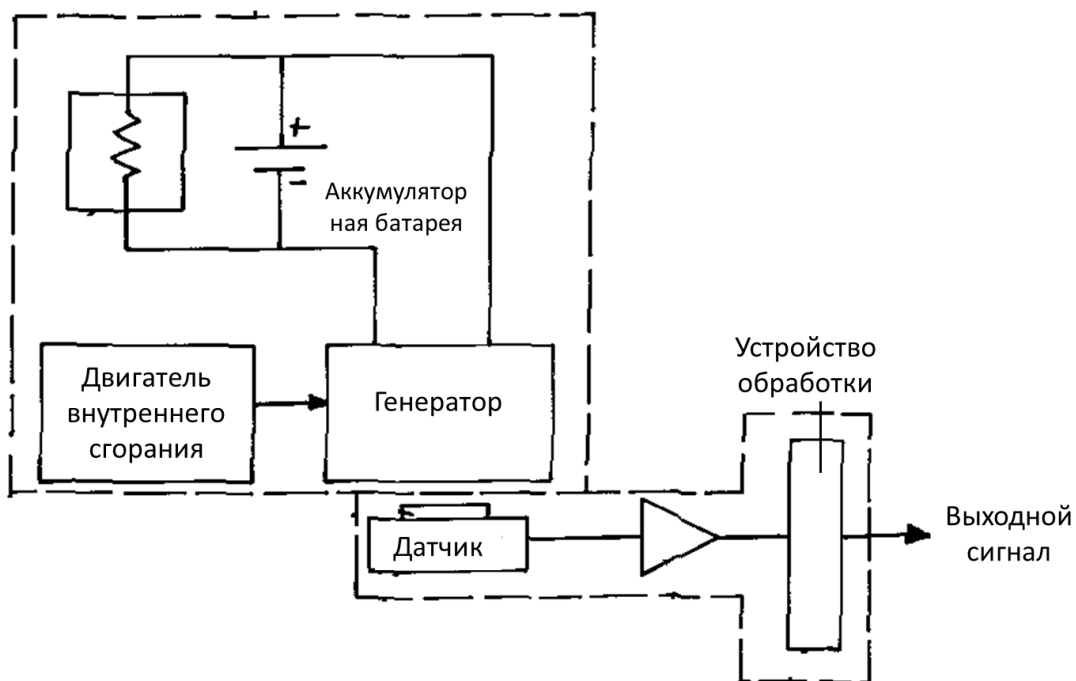


Рисунок 4.33 – Схема взаимодействия датчика с элементами автомобиля [79]

Известен метод и устройство для диагностики автомобильного генератора путем определения частоты пульсаций тока генератора (US 6806727) [80].

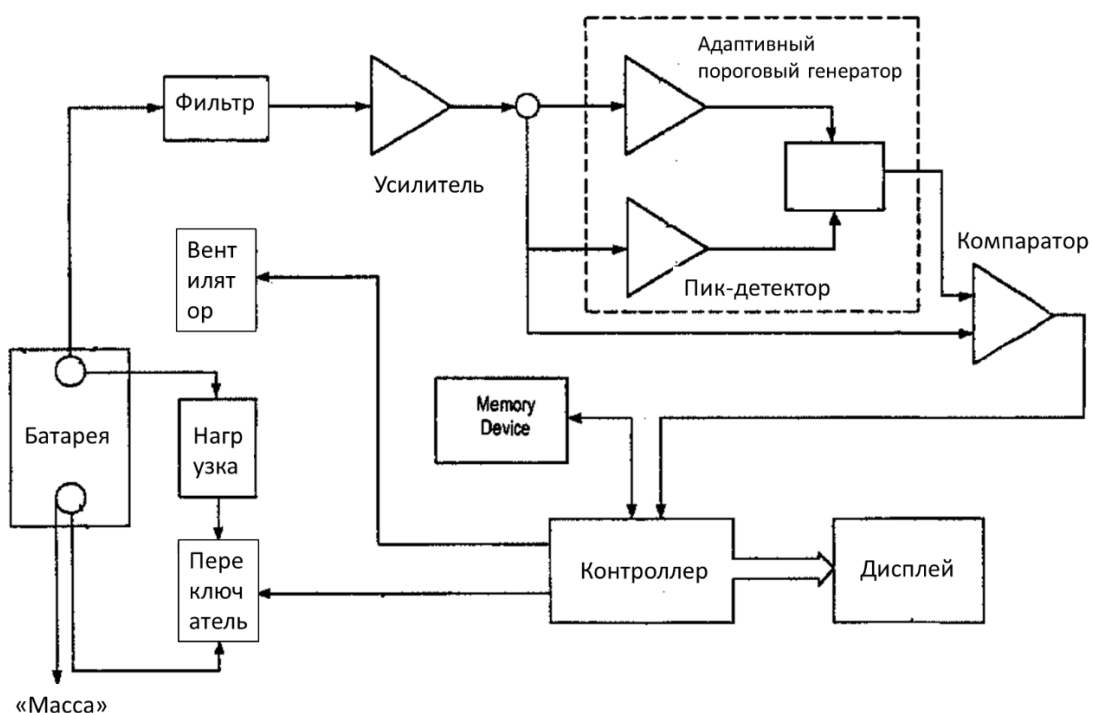


Рисунок 4.34 – Блок-схема устройства [80]

Устройство, получая информацию с вольтметра определяет частоту переменного тока. Для различных условий работы узла она должна составлять определенное значение. К таким условиям относятся частота вращения ротора генератора, которая определяется при помощи датчика положения коленчатого вала двигателя. Недостатком данного устройства можно считать низкую информативность, так как отклонение значения частоты переменного тока возникает при небольшом количестве неисправностей.

Известно устройство для определения неисправности автомобильного генератора (JP 3833600) [69] путем анализа характеристик волны пульсации напряжения. При помощи вольтметра определяется выходное напряжения генератора, а также период волны и размах пульсации. Определение технического состояния производится в несколько этапов: на первом этапе определяется период волны пульсаций, это позволяет определить неисправность статора. На втором этапе определяется разница между периодом волны на данном цикле и предыдущем, это позволяет установить неисправность выпрямителя. На третьем этапе устанавливается разница между средним напряжением на выходе генератора и напряжением в данный момент. Превышение этой разницы выше нормы говорит об отказе регулятора напряжения. Недостаток данного метода состоит в необходимости использования вычислительной аппаратуры с соответствующим программным обеспечением.

Известно устройство для определения неисправностей автомобильного генератора (DE 102012221936) [68] путем сравнения формы волны пульсаций напряжения генератора в процессе работы с эталоном. В памяти устройства хранятся данные о том, какая форма волны характеризует исправное состояние генератора, а также формы для определенных неисправностей. На рисунках 4.35 и 4.36 изображены формы волн пульсаций исправного генератора и генератора с неисправностью. Недостаток данного метода состоит в сложности сравнения форм волны

пульсаций, для этого необходимо сложное оборудование с соответствующим программным обеспечением.

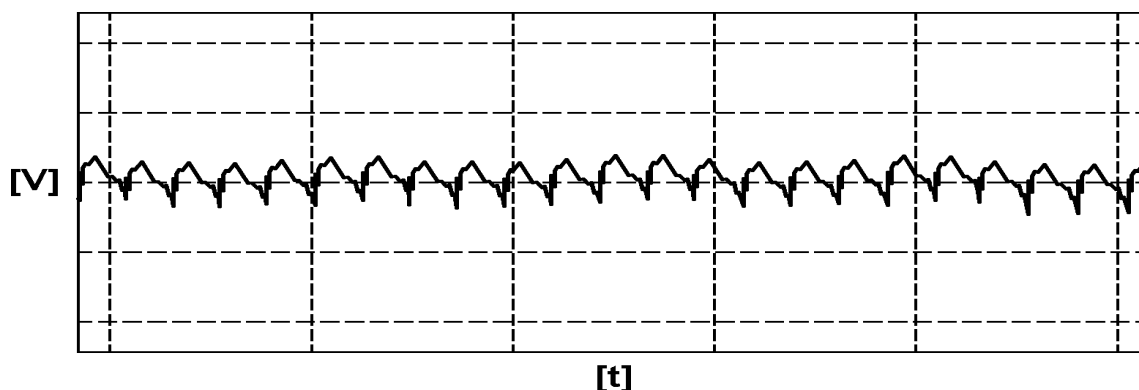


Рисунок 4.35 – Форма волны пульсаций исправного генератора [68]

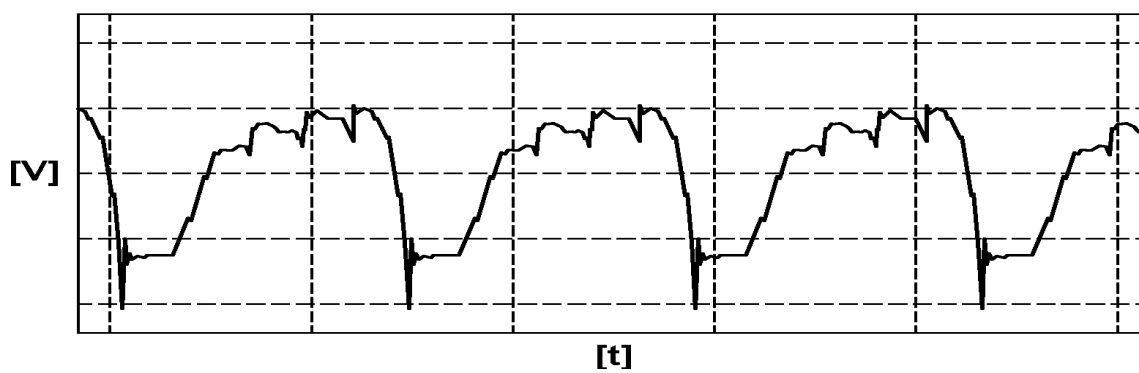
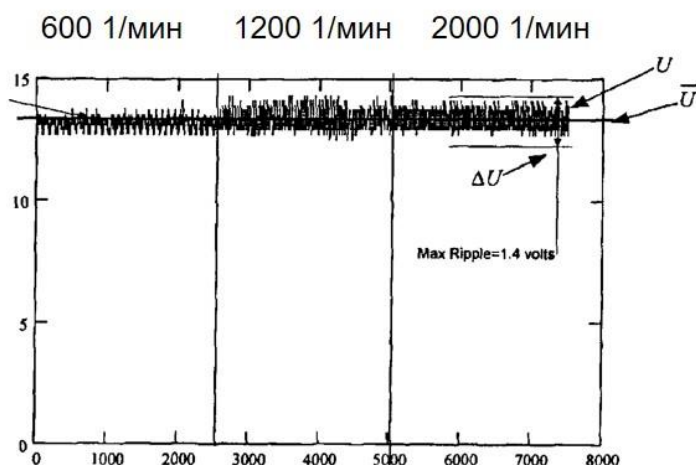


Рисунок 4.36 – Форма волны пульсаций генератора с неисправностью [68]

Известно устройство и метод идентификации технического состояния автомобильного генератора (US 6862504) [81] путем сравнения выходного напряжения и размаха пульсаций, характеризующих работу генератора при различных внешних условия, в частности при разных значения частоты вращения коленчатого вала. При возникновении несоответствия рабочих параметров генератора с внешними факторами генератор определяется как неисправный. Недостаток данного метода состоит в том, что не устанавливается, какая конкретно неисправность возникла.

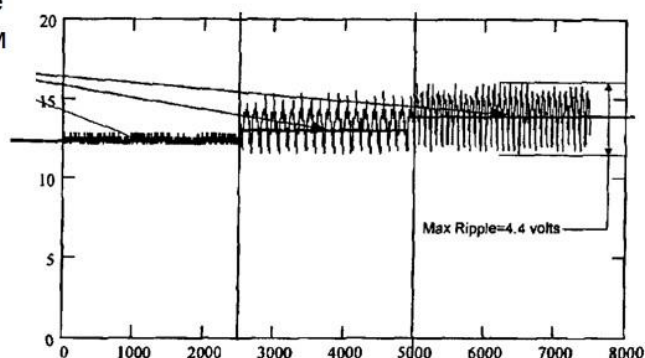
Среднее напряжение
около 13,2 вольт -
генератор исправен

Figure 2



Среднее напряжение
повышается с ростом
оборотов

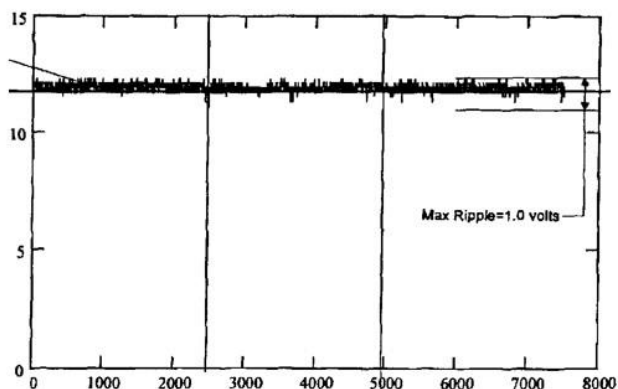
Figure 3a



Пульсация
чрезмерна по
сравнению с
исправным
генератором

Среднее напряжение
ниже напряжения
батареи – генератор
неисправен

Figure 3b



2 – исправный генератор; 3a – частично неисправный генератор; 3б – неисправный генератор

Рисунок 4.37 – График зависимости напряжения от частоты вращения коленчатого вала [81]

Известно устройство, тестер автомобильного генератора (US 7246015), [82] который определяет техническое состояние автомобильного генератора по параметрам напряжение и размах пульсации напряжения.

Определяя эти параметры устройство сравнивает их со значениями, которые являются нормальными для данных условий работы. Эти значения хранятся в памяти устройства. Недостатком данного метода является необходимость использования сложной вычислительной техники, а также сложность идентификации конкретных неисправностей.

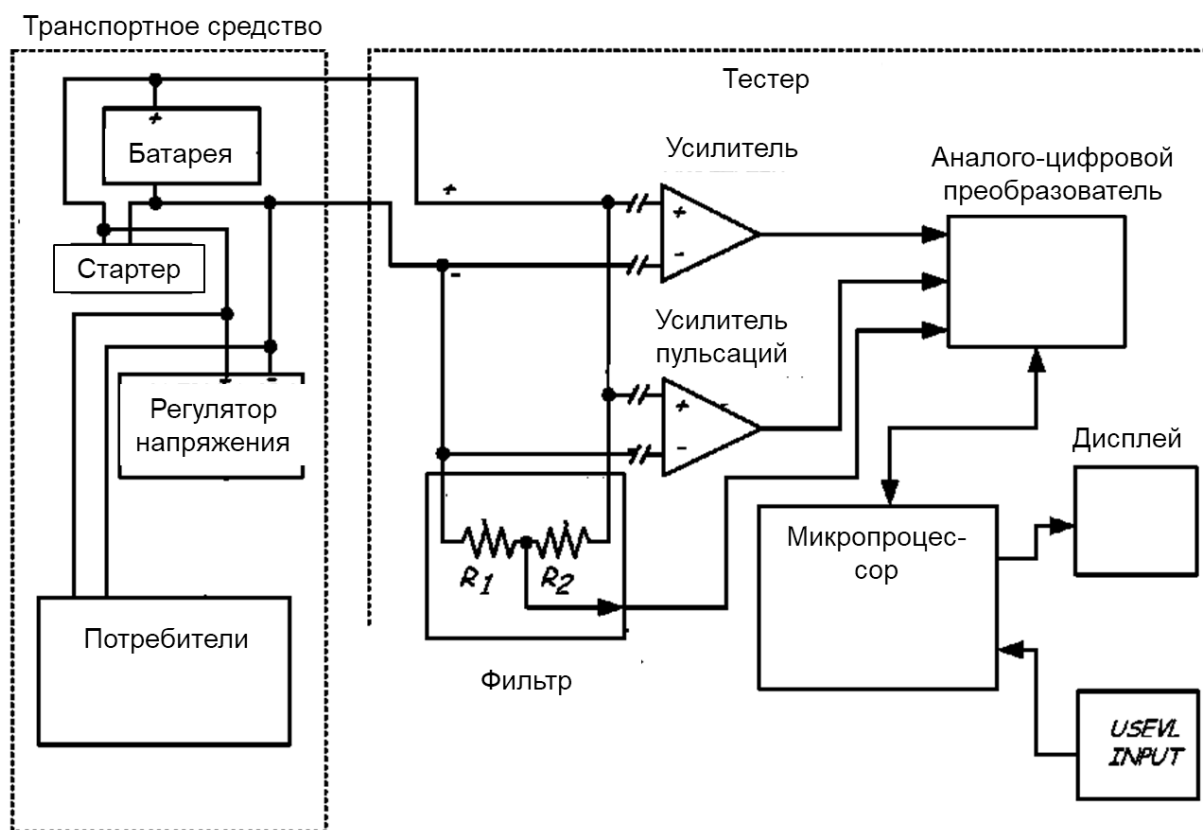


Рисунок 4.38 – Блок схема тестера [82]

Известен метод и устройство определения короткого замыкания диодного моста (US 9431941) [83] которое определяет неисправности выпрямителя автомобильного генератора путем определения напряжения и силы тока на обмотке возбуждения и периода пульсаций. Для каждой неисправности характерен свой период пульсации напряжения. Соответственно если пульсация тока в обмотке совпадает с пульсацией, характерной для определенной неисправности, генератор считается как неисправный.

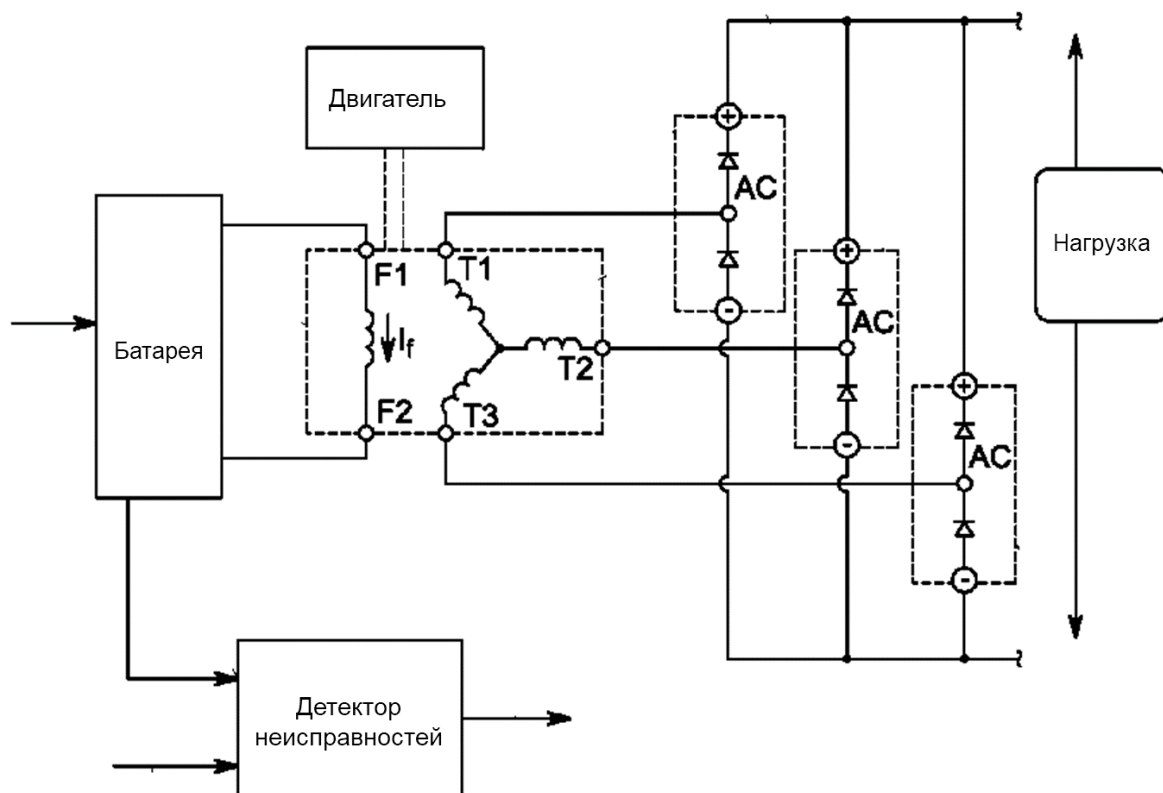


Рисунок 4.39 – Электрическая схема определения неисправности [83]

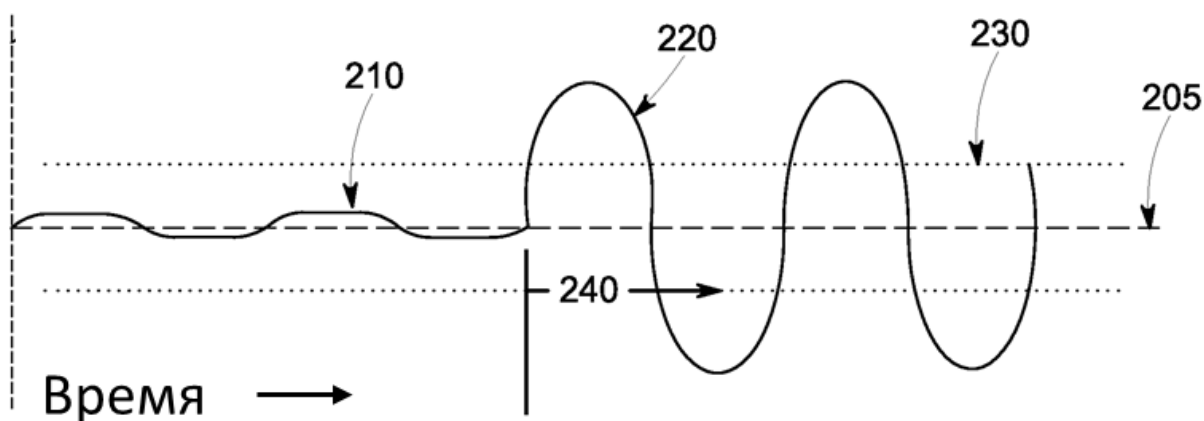


Рисунок 4.40 – Сигнал напряжения обмотки возбуждения генератора переменного тока и гистерезисная огибающая [83]

Известной устройство и метод определения неисправности фазы автомобильного генератора по его фазовым выходным сигналам (US 5252926) [78]. При определении технического состояния генератора устанавливается значение напряжения генератора, размаха его пульсаций. Путем сравнения полученных параметров с допустимыми устанавливается неисправность фаз статора. Недостаток данного метода состоит в том, что

определяется техническое состояние всего лишь одного элемента и не осуществляется идентификации неисправности в случае ее присутствия. Устройство просто сообщает о том, что фаза статора вышла из строя.

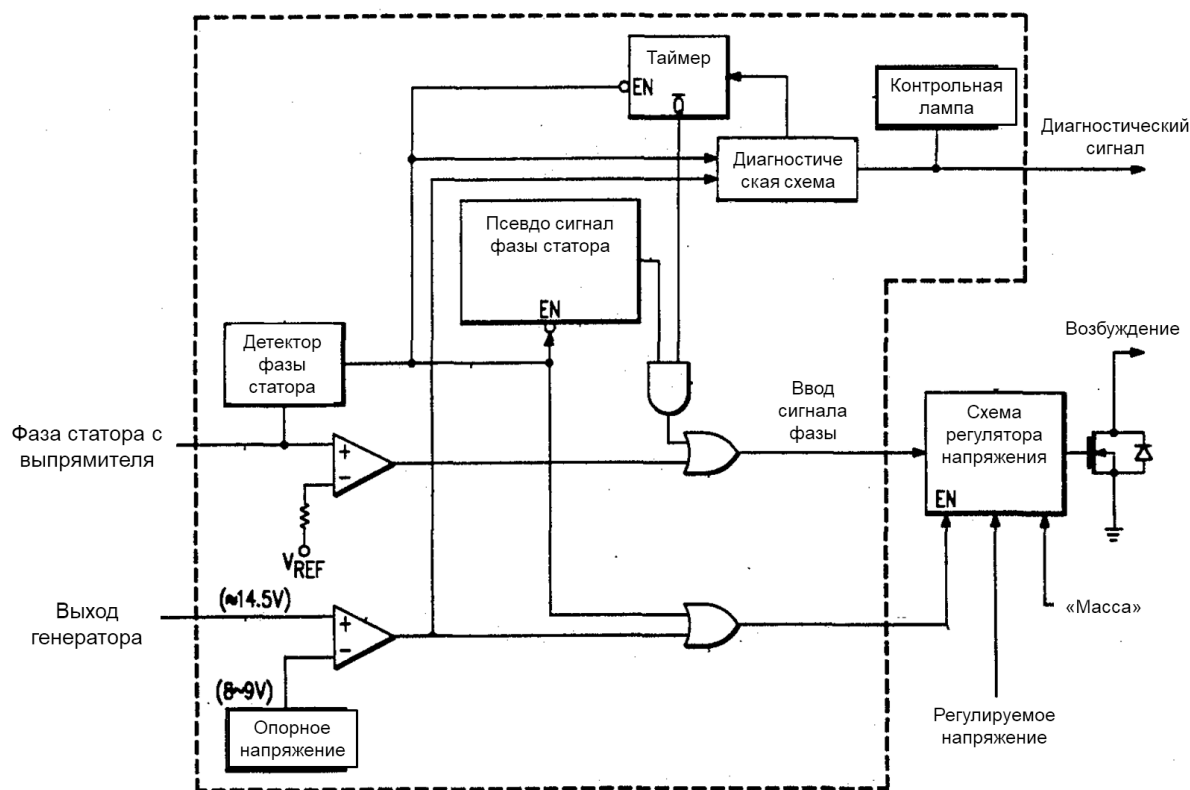


Рисунок 4.41 – Электрическая схема устройства [78]

Известно устройство для диагностирования автомобильного генератора (US 4379990), [77] определяющее его техническое состояние путем сравнения значений напряжения в различных точках цепей электрооборудования автомобиля. Эти точки находятся в связях между определенными компонентами генератора и всего электрооборудования. Для каждой такой связи существует диапазон, в котором должно находиться значение параметров. При оценке отклонения от этих значений идентифицируется неисправность элементов генератора. Недостатком данного метода является необходимость подключения к цепям, которые находятся в недоступном месте (в корпусе генератора и его элементов), соответственно данное устройство должно быть интегрировано в узел еще на стадии проектирования и производства.

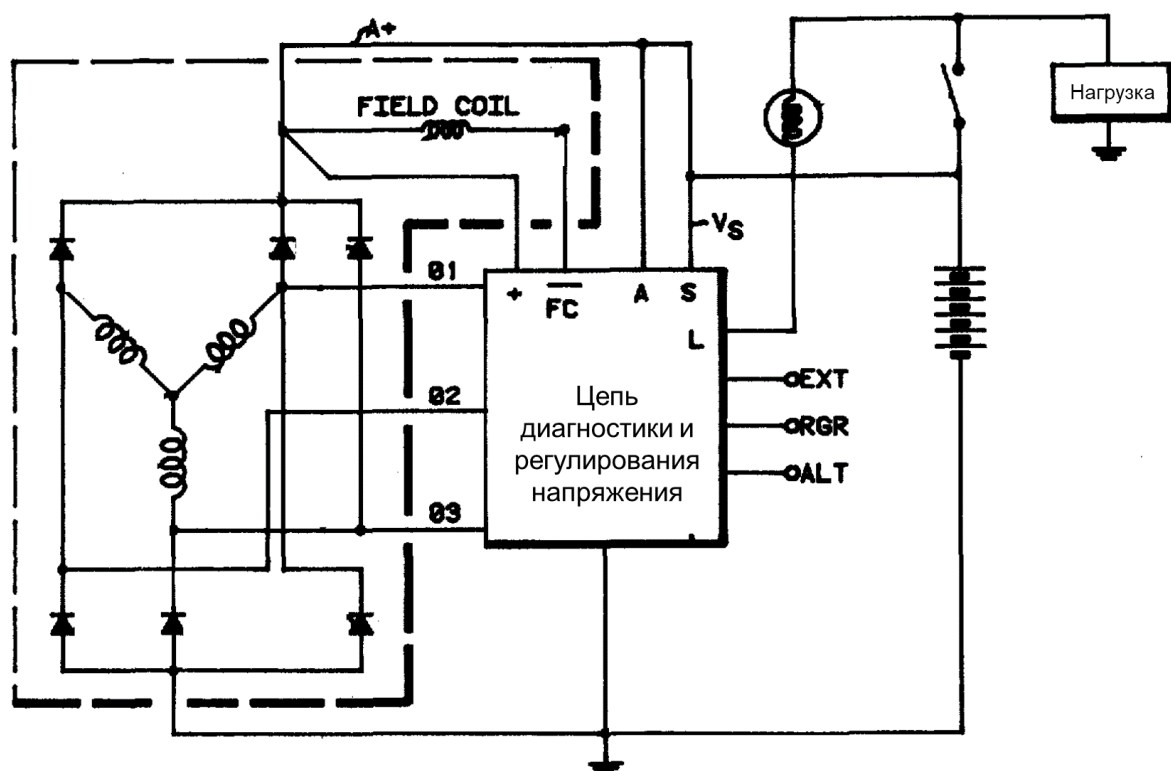


Рисунок 4.40 – Электрическая схема генератора с системой самодиагностики [77]

Известно устройство для идентификации неисправностей диодов в автомобильных генераторах (US 4156845) [74] путем сравнения пульсаций напряжения на выходе генератора с пульсациями напряжения на клеммах аккумуляторной батареи транспортного средства (рисунок 4.41). Недостаток данного метода заключается в необходимости подключения непосредственно к выходу генератора, соответственно требует разборки узла.

Известна автомобильная система тестирования электрической аппаратуры (US 3629704), [71] которая включается в бортовую электрическую сеть автомобиля без изменения проводки. Устройством производит анализ формы осциллограммы, величину пульсаций выходного напряжения генератора.

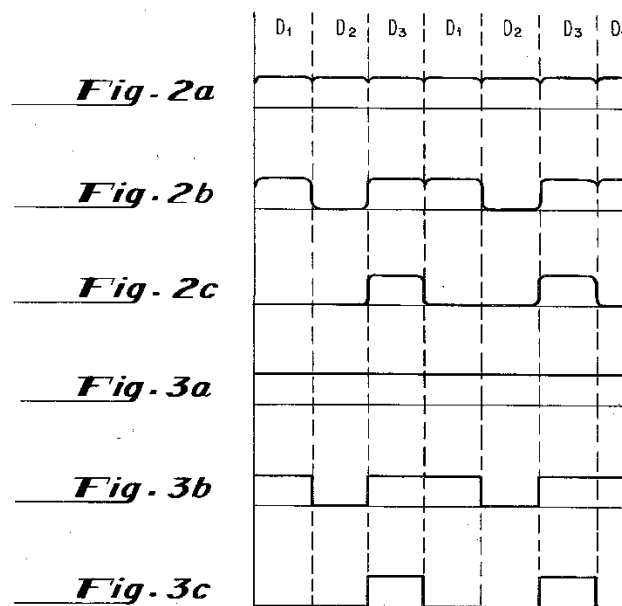
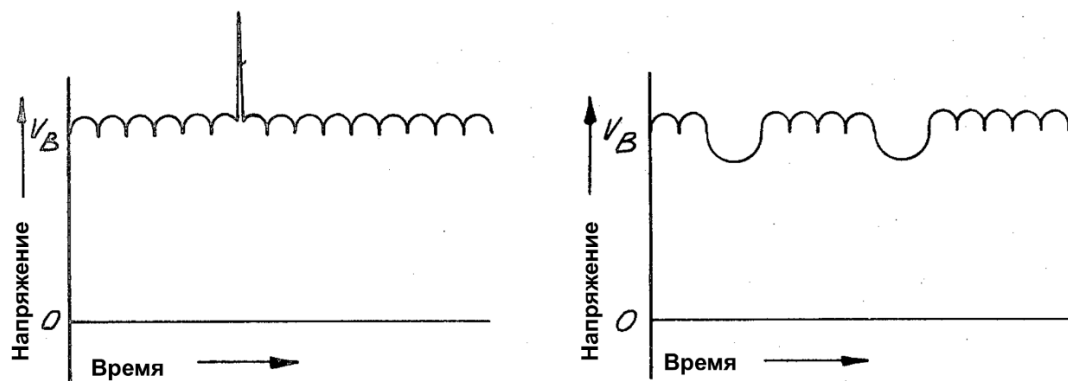


Рисунок 4.41 – Графики напряжения генератора и на клеммах АКБ при исправном выпрямителе (2а) и отказе одного из диодов [74]

Визуальная индикация измеряемых параметров позволяет устанавливать неисправности конкретных элементов генератора. На рисунке представлены формы осциллограмм для исправного генератора (а) и для генератора с отказом, когда один или более диодов генератора становятся открытыми или закороченными (б). Недостаток данного метода состоит в том, что при диагностировании главную функцию при идентификации неисправности возлагается на оператора, соответственно большое значение будет играть субъективность восприятия параметров конкретным человеком.



а – исправный генератор; б – отказ диода выпрямителя.

Рисунок 4.42 – Форма осциллограмм напряжения [71]

Известен метод обнаружения электрической неисправности в сети автомобиля (US 20110022261), [70] который предназначен для определения неисправностей в сети, содержащей одну батарею, один источник переменного тока и один преобразователь тока. Диагностика технического состояния осуществляется путем определения силы тока в различных цепях. Определяется значение силы тока АКБ, силы тока в преобразователе тока и силы тока в промежуточной цепи. Эти значения сравниваются, и на основании полученного результата устанавливается техническое состояние генератора. Недостаток данного метода состоит в сложности подключения в нескольких точках сети автомобиля, и при этом метод позволяет лишь определить неисправный элемент, но не дает данных о конкретной неисправности.

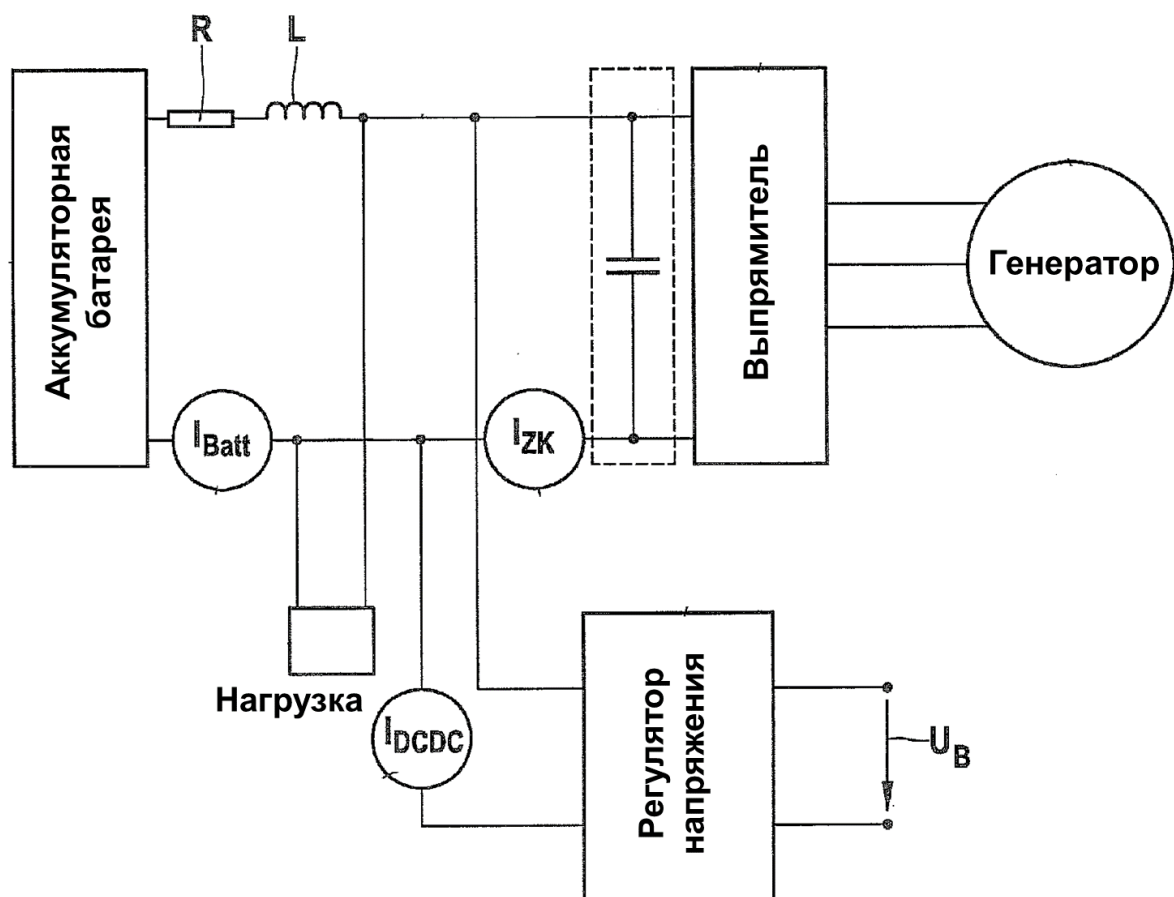


Рисунок 4.43 – Схема расположения измерительных приборов [70]

Известно устройство: индикатор неисправности генератора автомобиля (US 4019120), [73] которое определяет техническое состояние

генератора, диодного выпрямителя и регулятора напряжения. Оценка технического состояния производится на основе разности токов и напряжения генератора и АКБ. Определенные неисправности вызывают определенные значения этих разностей. Индикация неисправностей осуществляется посредством светодиода. При определенных неисправностях он мигает, при прочих горит постоянно. Недостаток данного метода состоит в ограниченности его использования, большое количество неисправностей не определяются.

Известно устройство: тестер генератора автомобиля (US 3893029), [72] которое определяет техническое состояние автомобильного генератора путем сравнения параметров: силы тока и напряжения переменного тока и постоянного соответственно на выходе генератора и клеммах АКБ. Если значение постоянного тока выше заданного уровня, а значение переменного тока ниже заданного уровня то генератор исправен. Недостатком метода является то, что конкретные неисправности не устанавливаются. Определяется лишь то, исправен узел или нет.

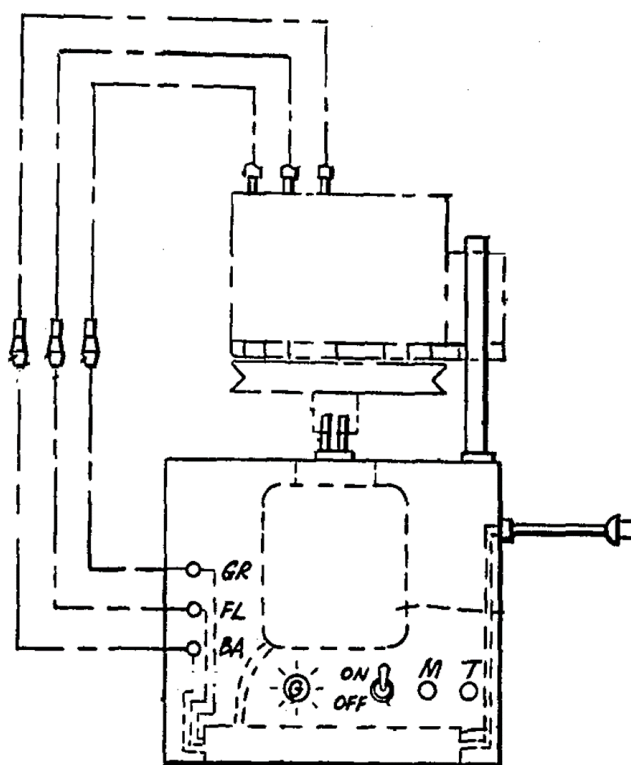


Рисунок 4.44 – Внешний вид устройства [72]

В статье [84] «Спектральное исследование выходного напряжения автомобильного генератора» представлено спектральное исследование выходного напряжения генератора. Для того что бы оценить колебательные процессы напряжения генератора его испытывали в различных режимах. Испытания проводились при минимальной нагрузке на генератор, а также при сбалансированной нагрузке и несбалансированной.

Основной идеей, которую доносит автор является то, что при разном техническом состоянии генератора, при различной нагрузке на узел будет отличным спектр выходного напряжения.

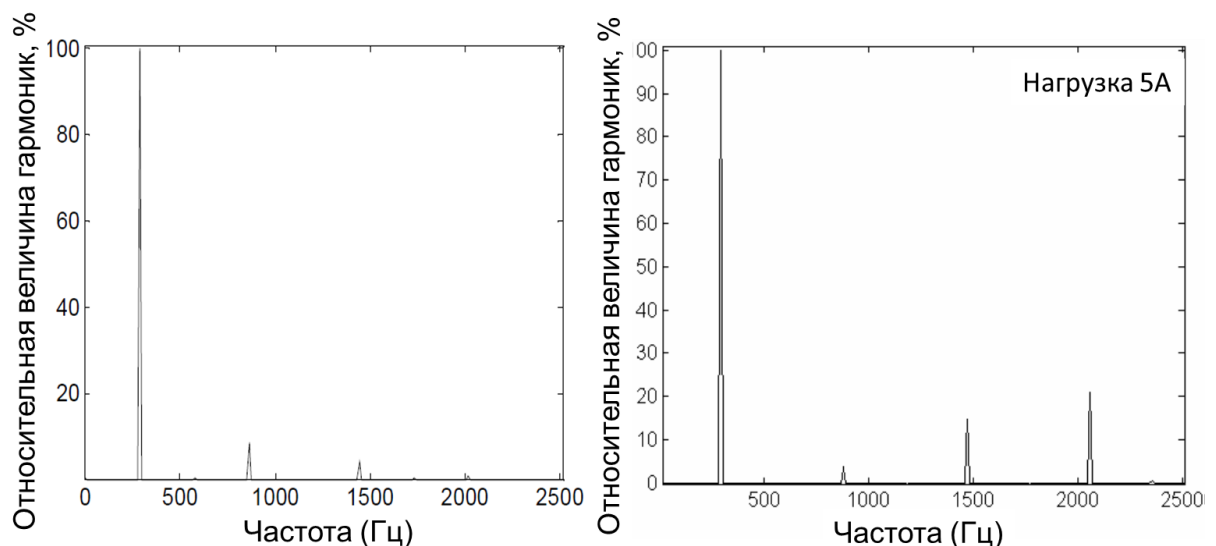


Рисунок 4.45 – Спектр выходного напряжения (слева без нагрузки, справа при несбалансированной нагрузке) [84]

В статье [63] рассматривается проблема диагностирования автомобильного генератора. Автором предлагается использование метода адаптивных порогов. Для этого необходимо произвести разработку математической модели поведения генератора в различных условиях в зависимости от значения определенных параметров.

Основой использования метода должно являться сравнения реальных значений параметров со значениями, полученными при помощи математической модели. На основе того сравнения можно делать выводы о техническом состоянии генератора. Автором проведено исследование, математическая модель проверена на жизнеспособность. Получены некоторые зависимости параметров для исправного генератора и для ряда неисправностей.

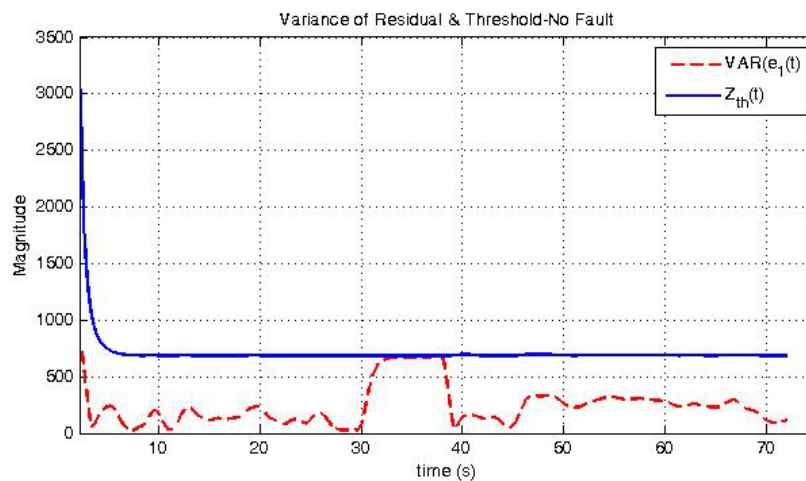


Рисунок 4.46 – Исправный генератор [63]

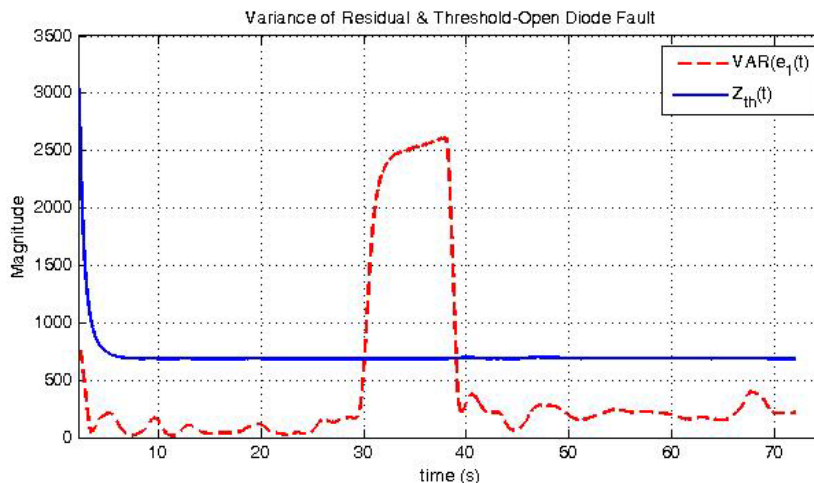


Рисунок 4.47 – Отказ диода [63]

В статье [85] «Диагностика автомобильной системы электроснабжения при помощи моделирования» авторами предлагается алгоритм проведения оценки технического состояния системы

электрооборудования автомобиля. Этот алгоритм содержит разработанную авторами математическую модель работы всех элементов системы, в частности: аккумуляторная батарея, генератор, выпрямитель и регулятор напряжения. Математическая модель работы этих элементов получена на основе физических процессов, связанных с изменением рабочих параметров с течением времени. Описание разработанных моделей осуществляется посредством нелинейных дифференциальных уравнений.

В качестве параметров в модели используются выходной ток генератора переменного тока, выходное напряжение и напряжение батареи. Получение информации о состоянии элементов системы осуществляется путем сравнения ожидаемых значений с реальными. Для проведения испытаний, анализа результатов, а также калибровки порогов диагностических параметров предлагается стенд, схема которого представлена на рисунке 4.48.

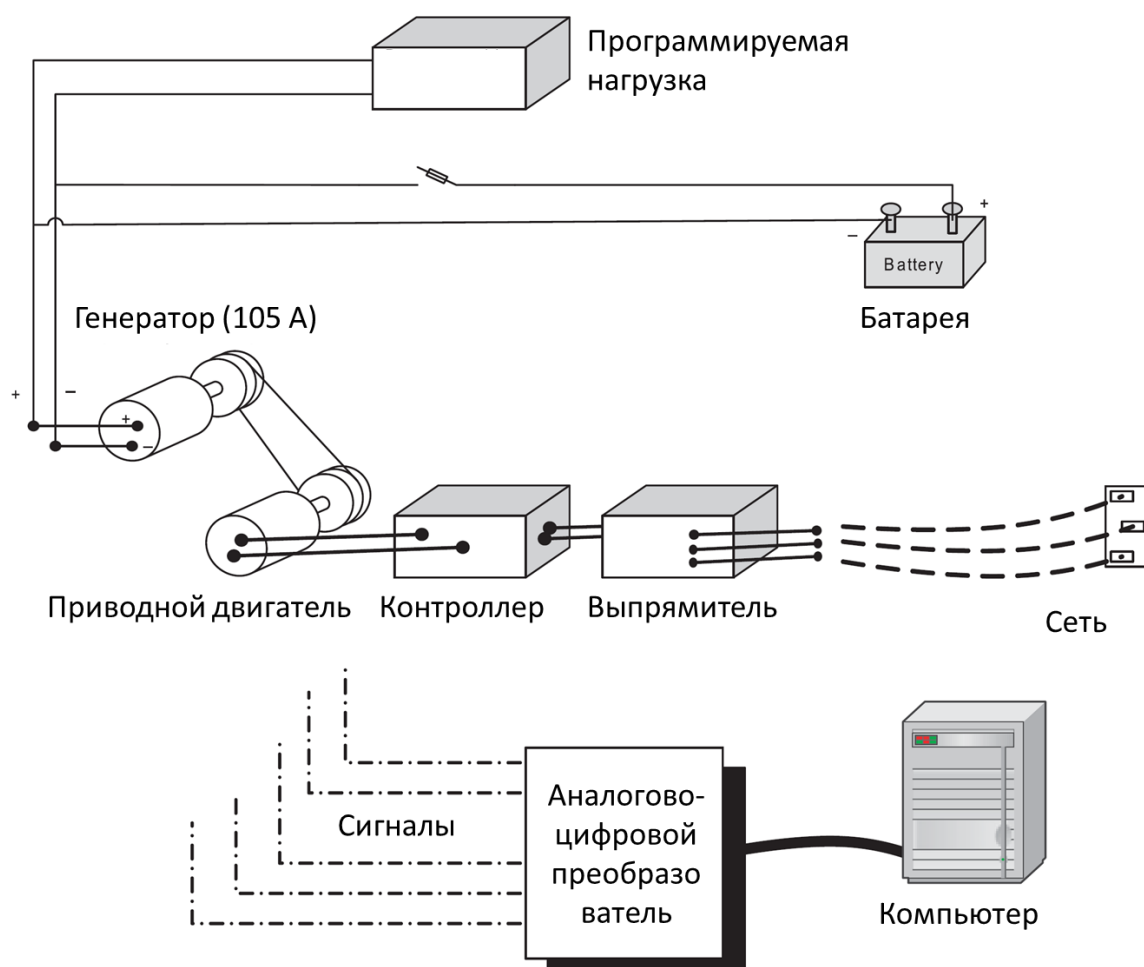


Рисунок 4.48 – Схема испытательного стенда [85]

В работе [62] «Оперативная диагностика неисправностей автомобильной системы электроснабжения» автором проводится изучение зависимостей параметров работы генератора при различных внешних условиях с течением времени. На основе полученных результатов составлены диаграммы, представляющих собой зависимость изменения различных параметров от времени. Помимо исправного генератора, данные получены и при имитации известных неисправностей.

На основе всех этих результатов автором предлагается математическая модель, которая позволяет в реальном времени, путем анализа рабочих параметров узла устанавливать его техническое состояние и идентифицировать его неисправности.

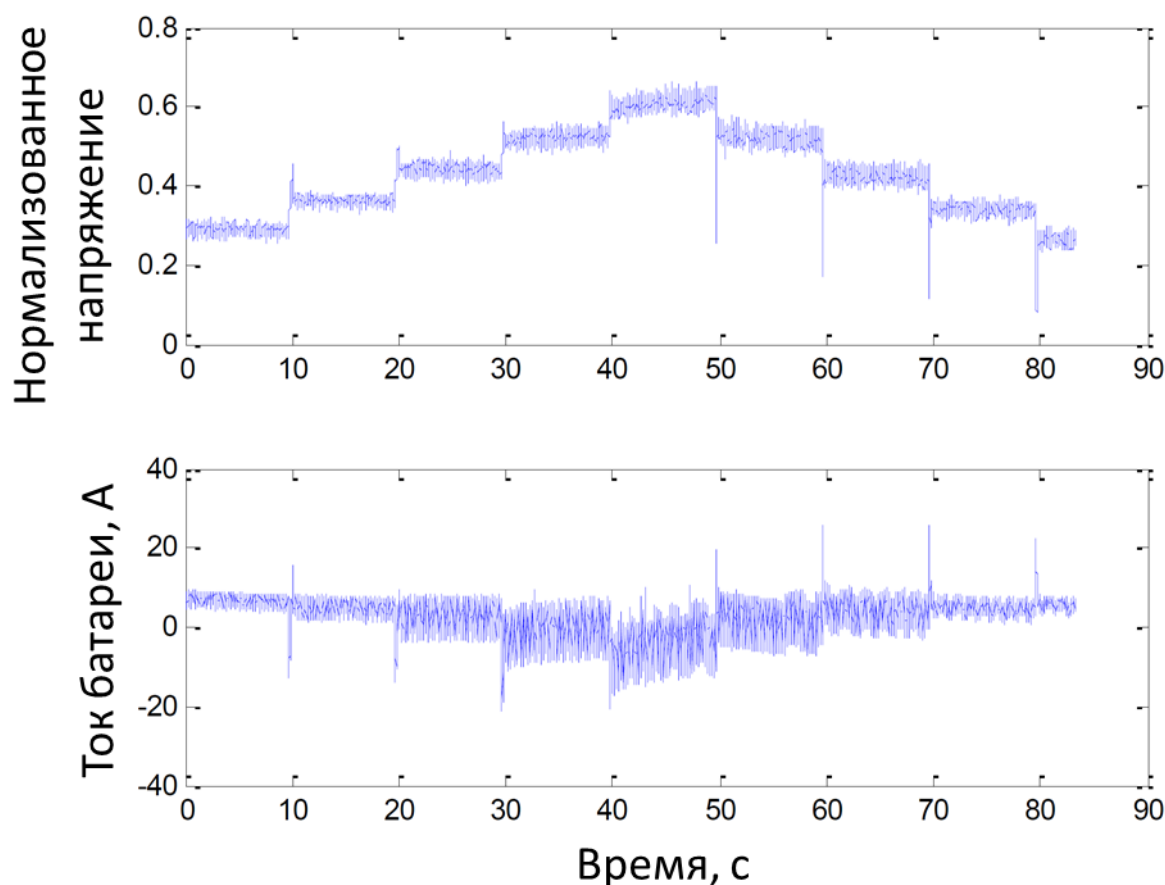


Рисунок 4.49 – Напряжение и ток батареи при исправном состоянии [62]

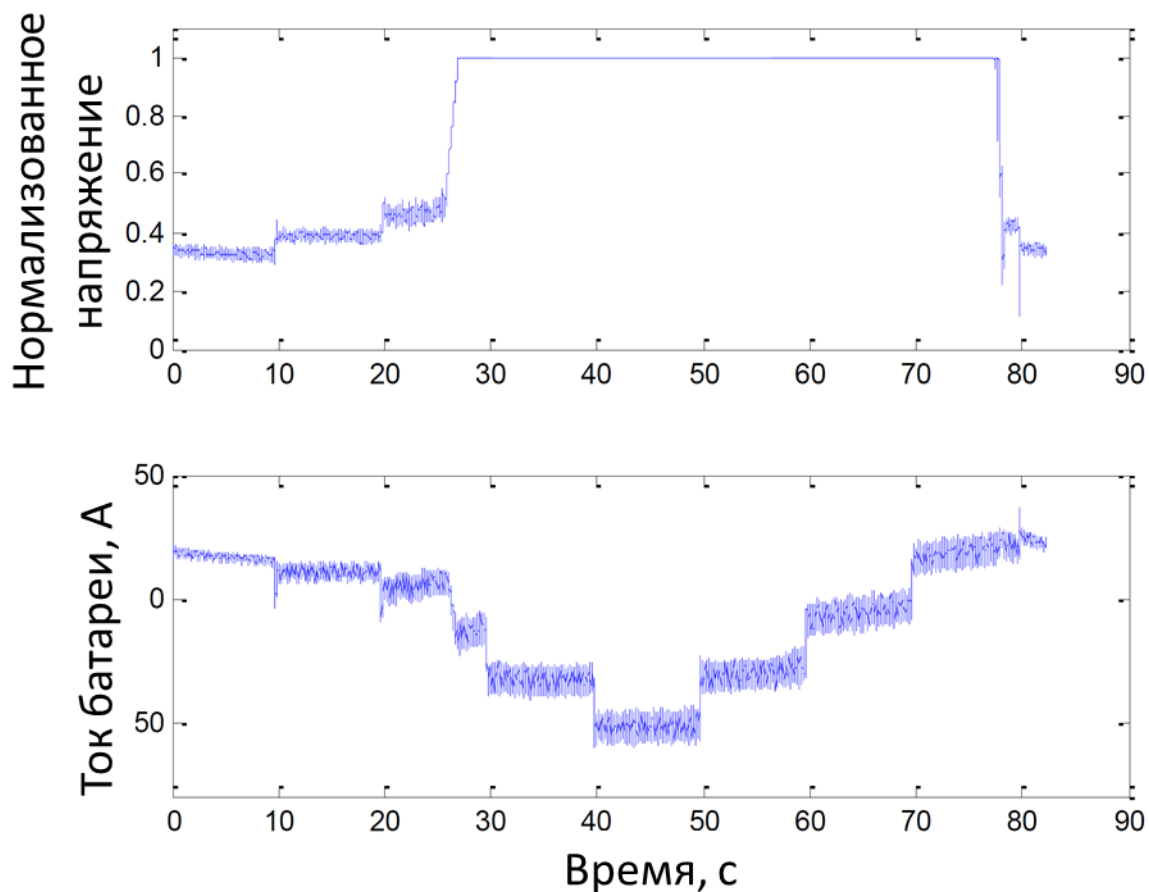


Рисунок 4.50 – Напряжение и ток батареи при скольжении ремня привода [62]

Спектры тока и напряжения [57] представлены для новых, использованных до и после выхода из строя генераторов на рисунках 4.51 – 4.53. Спектры тока и напряжения имеют очень сходную структуру для всех случаев, и следующие наблюдения применимы к обоим. Частотные спектры показывают четкие пики на частоте пульсации $36X$, и ее гармоники (до $180X$) для всех случаев. Пример графика нового генератора представлен на рисунке 4.51, отображая $36X$ пик и гармоники. Визуальный осмотр спектров тока и напряжения (в приложении) выявил некоторые интересные наблюдения. Спектры очень похожи для всех действующих генераторов. Компонент $36X$ легко наблюдать. Даже неисправный генератор имеет пики в $36X$ и его гармоники; однако величины намного, намного ниже, чем в $36X$ и его гармоники;

других случаях. Используемый генератор переменного тока имеет пик в 12X, который не наблюдается ни для одного из новых генераторов.

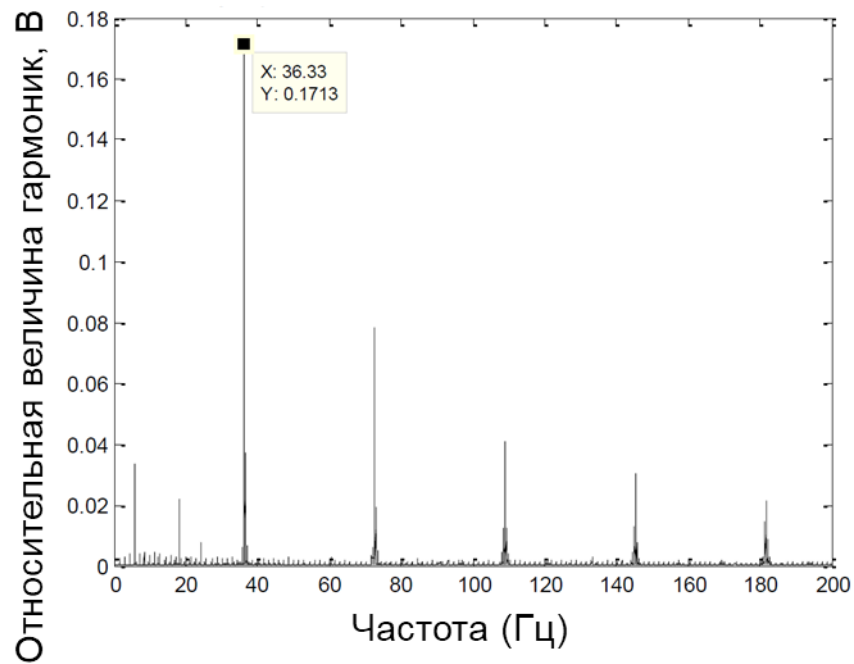


Рисунок 4.51 – Спектр выходного напряжения нового генератора [57]

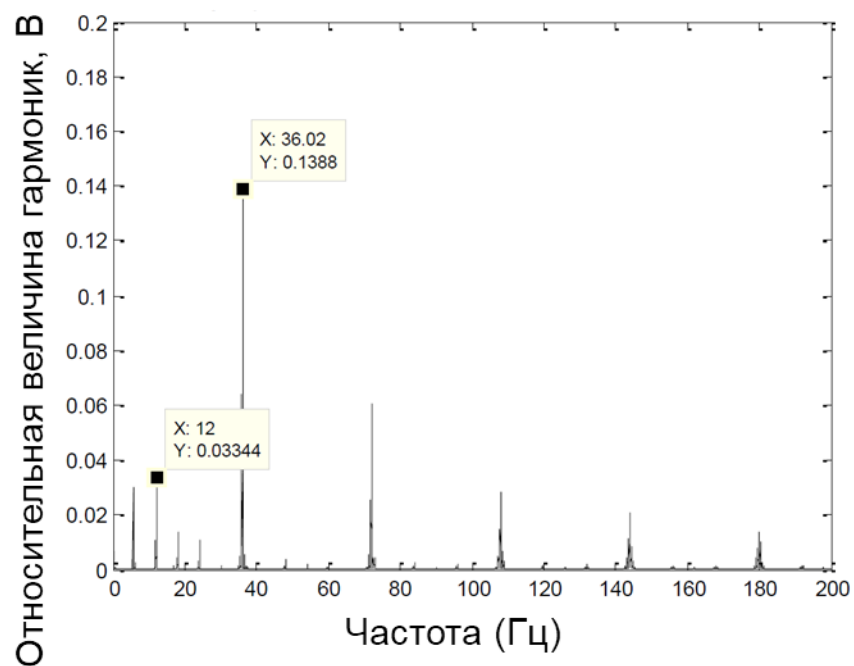


Рисунок 4.52 – Спектр выходного напряжения генератора с наработкой [57]

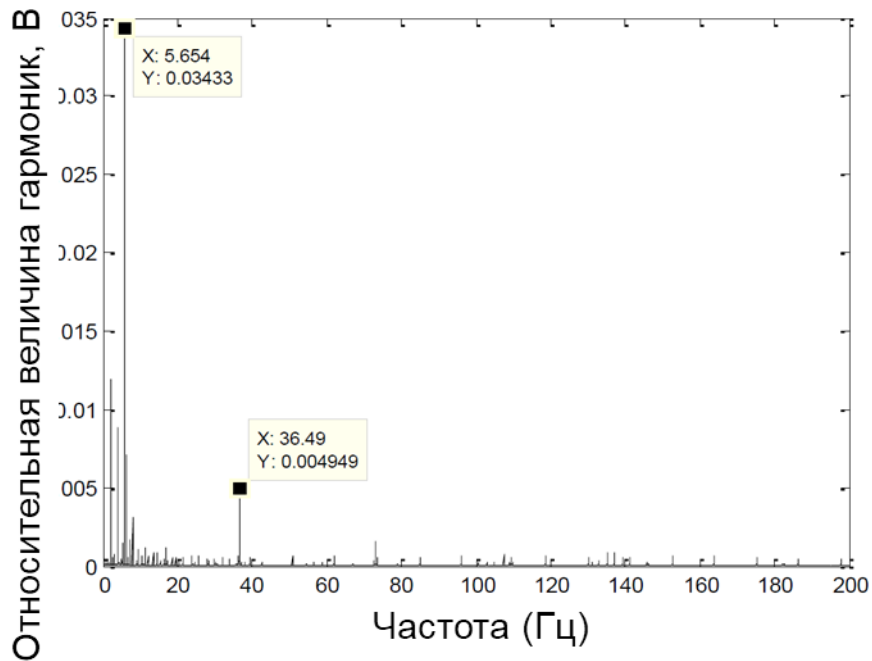


Рисунок 4.53 – Спектр выходного напряжения неисправного генератора [57]

Изменение спектра выходного напряжения в аномальных режимах работы генератора рассмотрены в исследованиях [58].

Автор установил, что различные неисправности генератора можно соотнести с возникновением соответствующей гармонической составляющей (рисунок 4.54).

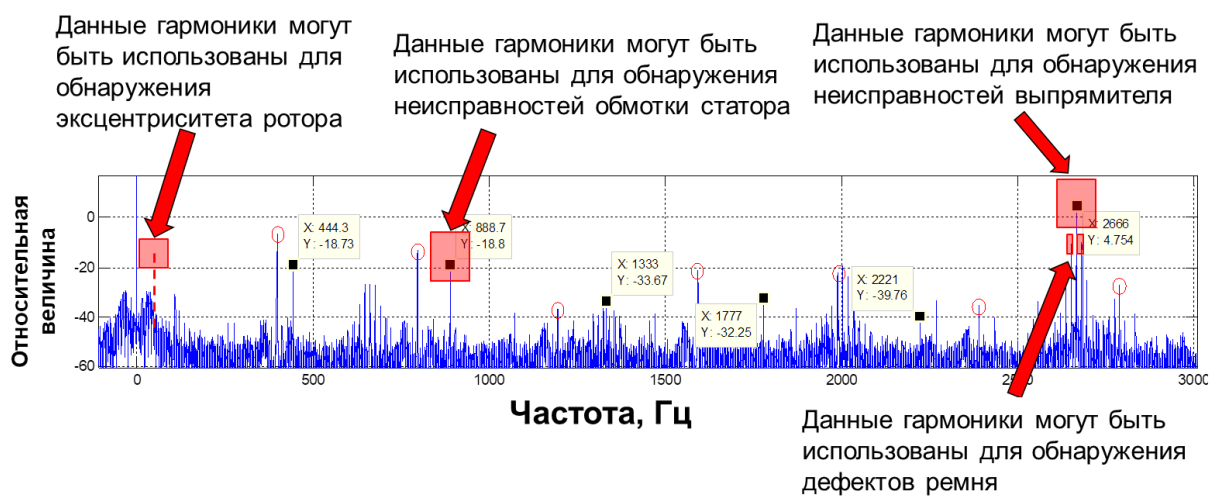


Рисунок 4.54 – Результаты спектрального анализа напряжения генератора [58]

Анализ характерных неисправностей генераторной установки, выполненный в работе [25] показал, что на форму выходного сигнала существенно влияют неисправности статора и выпрямительного блока. Неисправности ротора и регулятора напряжения такого влияния на выходной сигнал не оказывают. Как правило, при неисправности в цепи возбуждения выходной сигнал или пропадает совсем, или его форма соответствует исправному состоянию (рисунок 4.55).

При возникновении неисправностей в обмотке статора (межвитковые и межфазные замыкания, а также замыкания на «массу») выходной сигнал генератора может искажаться совершенно непредсказуемо. В отличие от статора выпрямительный блок имеет лишь две характерные неисправности, поэтому в большинстве случаев отказа выпрямительного блока выходной сигнал имеет характерное отклонение от исправного состояния (рисунки 4.56 и 4.57).

Характерное искажение выпрямленного напряжения также будет возникать при обрыве фазы (рисунок 4.58).

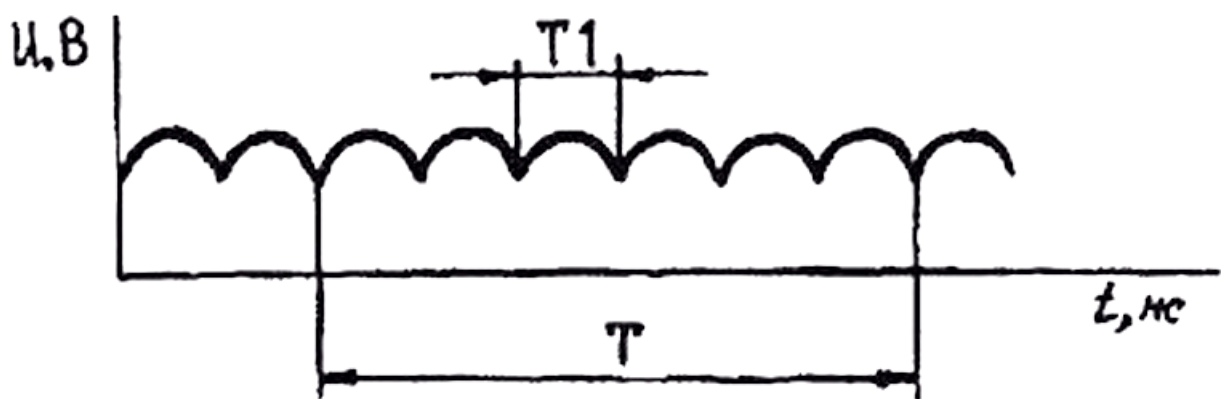


Рисунок 4.55 – Форма выпрямленного напряжения генераторной установки в исправном состоянии [25]

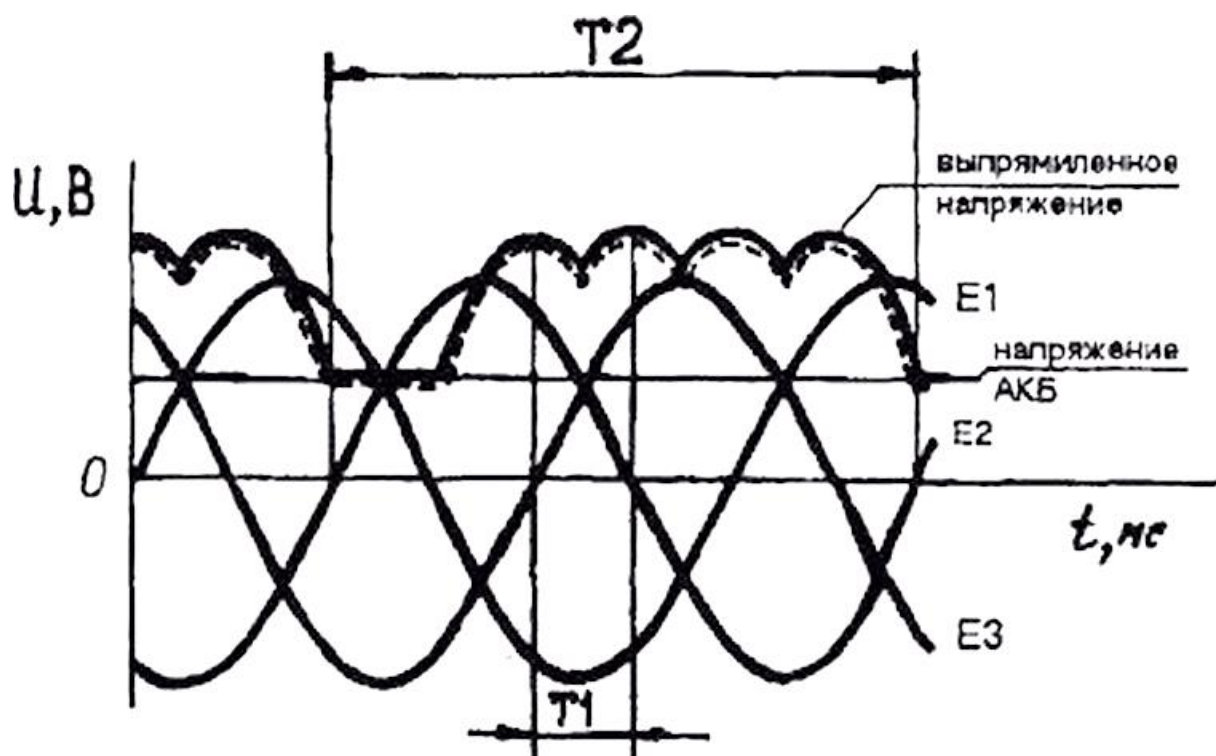


Рисунок 4.56 – Форма выпрямленного напряжения генераторной установки при обрыве диода [25]

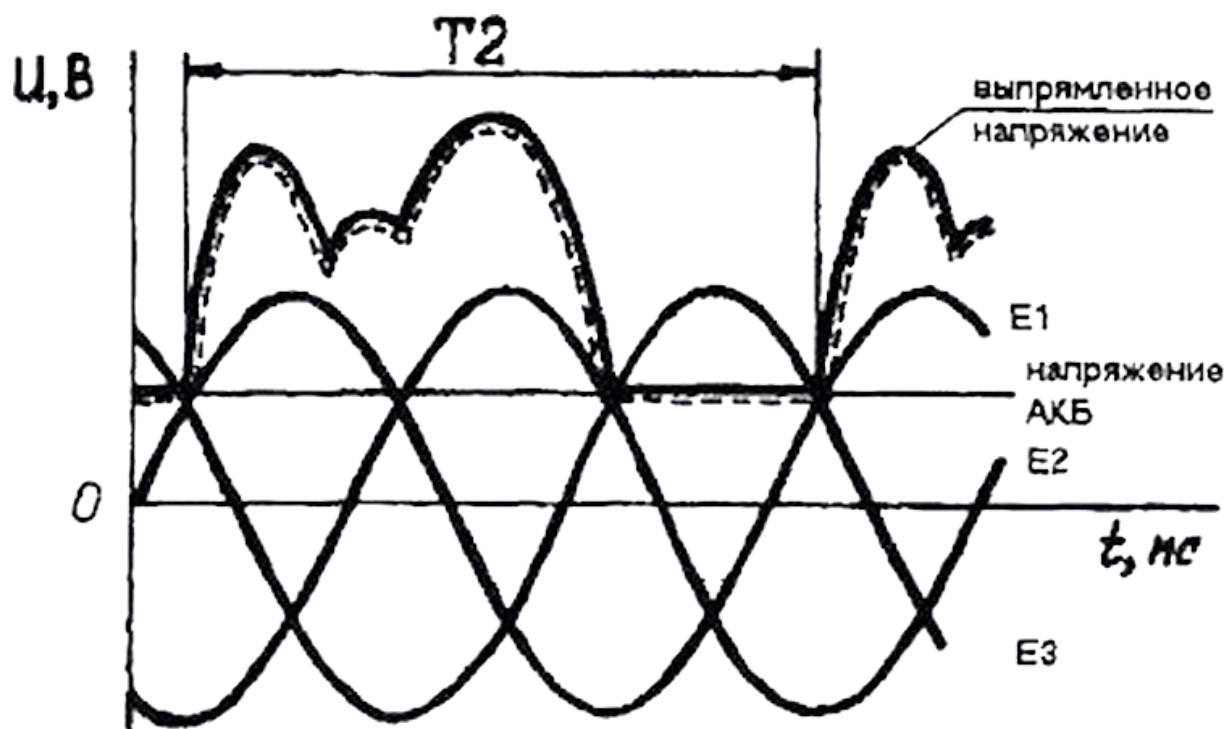


Рисунок 4.57 – Форма выпрямленного напряжения генераторной установки при пробое диода [25]

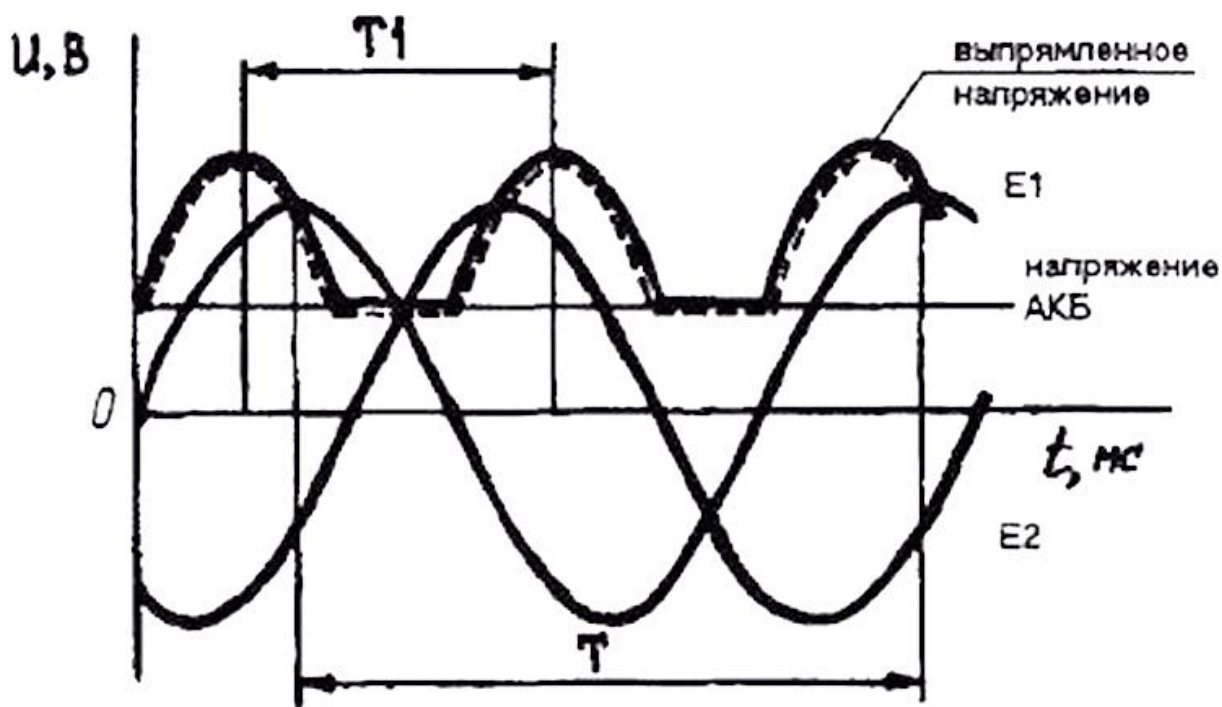


Рисунок 4.58 – Форма выпрямленного напряжения генераторной установки при обрыве фазы [25]

Широко известен способ, основанный на визуальном сопоставлении полученных при диагностировании осциллограмм с типовыми, соответствующими конкретной неисправности автомобильного генератора (рисунок 4.59) [4, 25, 32, 41, 47].

Безусловно, данный метод проверки отличается наименьшей трудоемкостью, однако реально снятые осциллограммы, из-за сглаживающего воздействия аккумуляторной батареи, значительно отличаются от типовых, что не позволяет достоверно определить неисправности генератора.

Кроме того, типовые осциллограммы характерных неисправностей генераторов приводятся для конечной стадии их развития (обрыв и замыкание обмотки или диода выпрямителя и т.д.), что существенно затрудняет определение неисправностей на начальной стадии развития и их своевременное устранение.

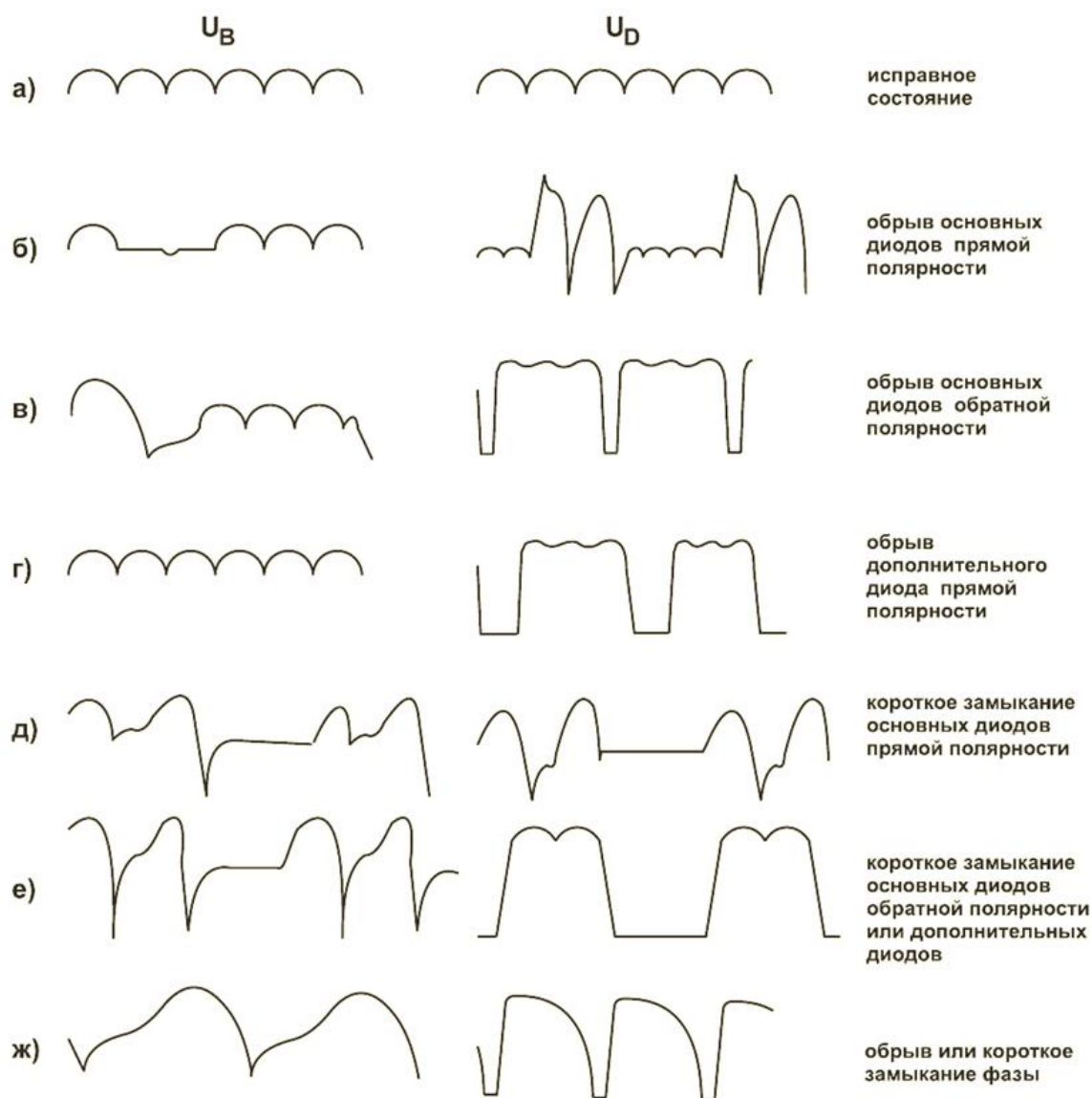
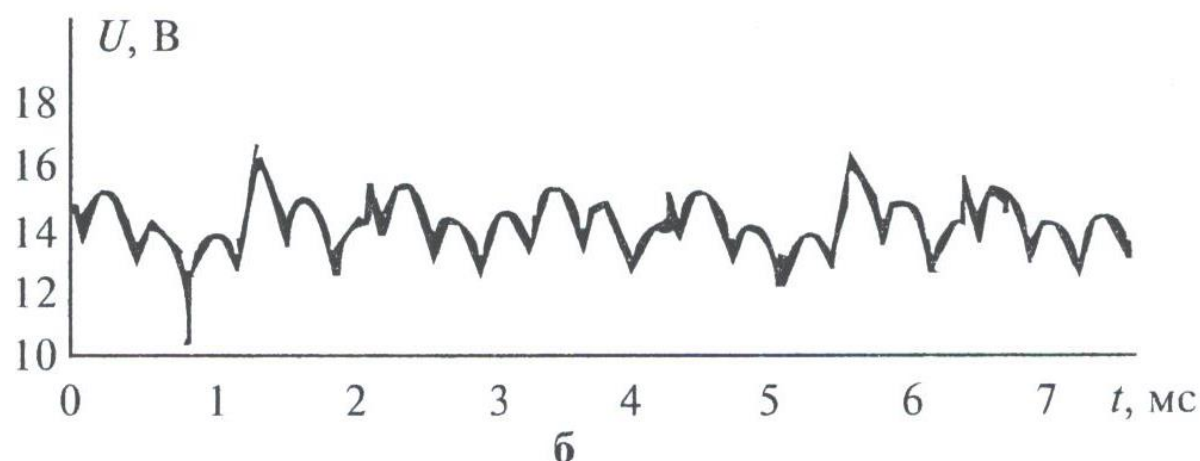
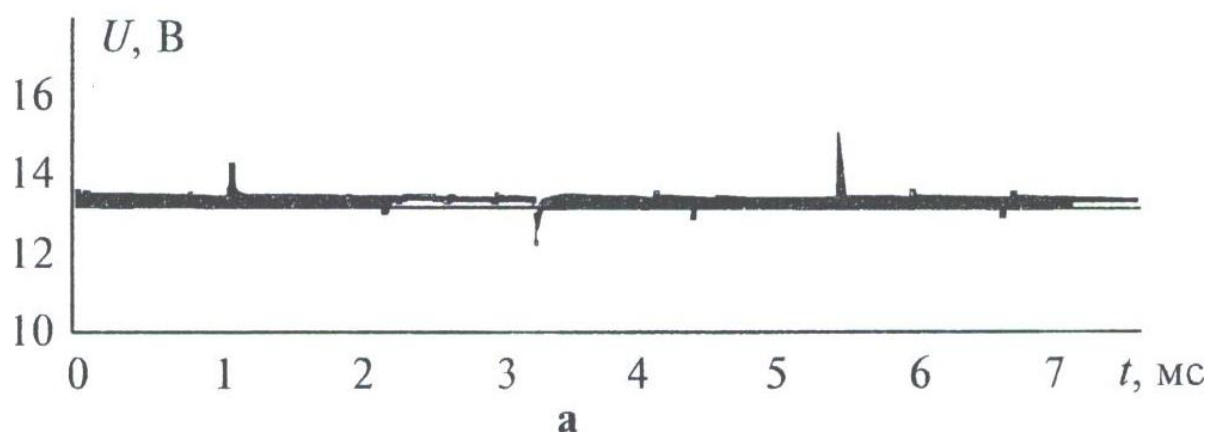


Рисунок 4.59 – Типовые осциллограммы выходного напряжения генераторов транспортных средств

Авторами статьи [10] предложен способ повышения чувствительности осциллограмм напряжения заменой аккумуляторной батареи активной нагрузкой. Характерная осциллограмма напряжения исправного генератора, полученная при совместной работе генераторной установки с аккумуляторной батареей 6СТ-60, представлена на рисунке 4.60, а, без батареи – на рисунке 4.60, б.

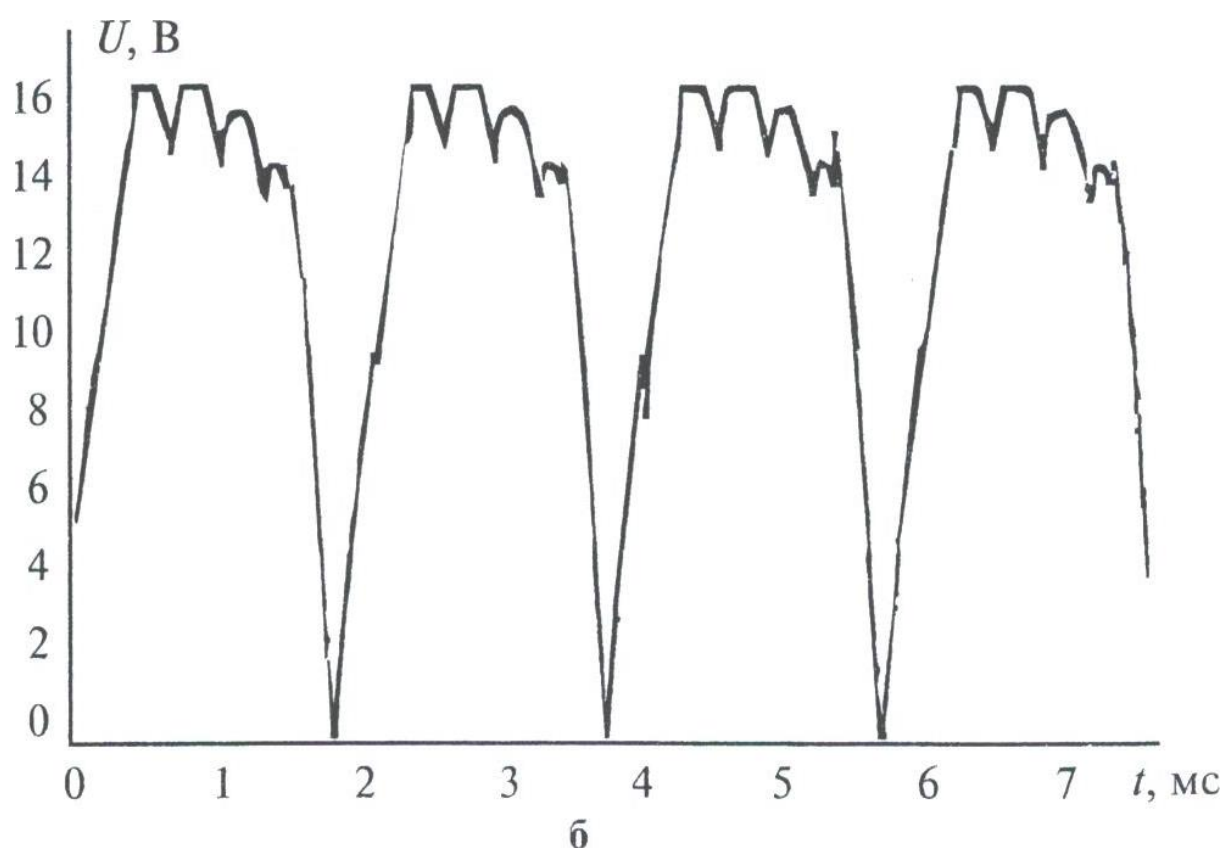
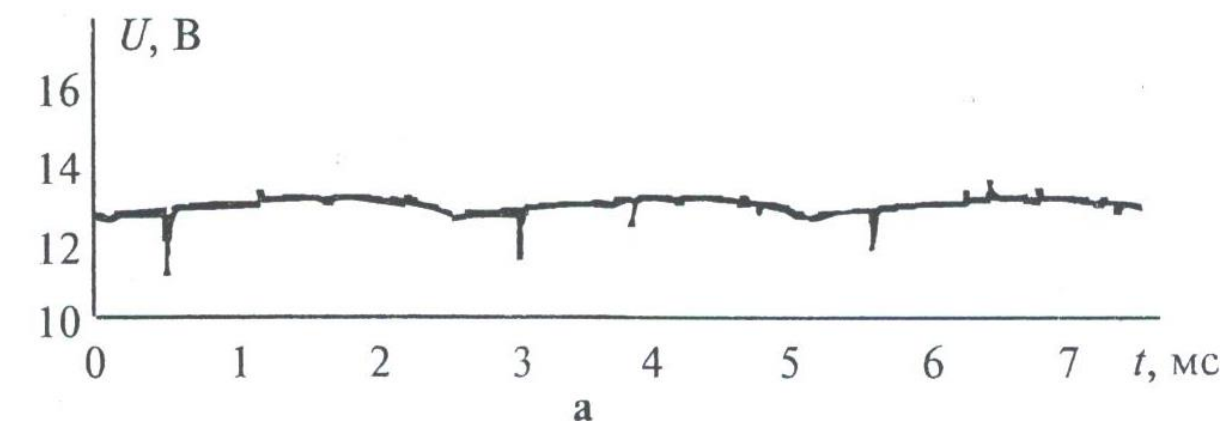


а – с аккумуляторной батареей; б – с реостатом (без батареи).

Рисунок 4.60 – Осциллограммы напряжения исправного генератора во времени [10]

В связи с тем, что аккумуляторную батарею нельзя отключить от бортовой сети автомобиля, авторы [10] предлагают на время диагностирования отключать от нее генератор. При этом необходимо возбуждение генератора и создание на нем активной нагрузки.

На рисунке 4.61, а приведена осциллограмма напряжения генератора при обрыве цепи положительного диода выпрямительного блока генератора, работающего совместно с аккумуляторной батареей. По ней сложно сделать какое-либо заключение о техническом состоянии генератора. Видно только, что осциллограмма несколько изменилась при сравнении ее с эталонной осциллограммой (см. рисунок 4.61, а).



а – с аккумуляторной батареей; б – без батареи.

Рисунок 4.61 – Осциллограмма напряжения генератора во времени при обрыве положительного диода [10]

Обрыв положительного диода можно принять за наводку от работы силовой сети поста диагностики. Однако при этом рабочие характеристики генератора изменяются, понижается напряжение на выходе, возрастает частота вращения коленчатого вала двигателя, при которой происходит возбуждение генератора, понижается мощность генератора на режиме

холостого хода. Это приводит к систематическому недозаряду аккумуляторной батареи.

На рисунке 4.61, б изображена осциллограмма напряжения генератора с обрывом положительного диода при работе на активное сопротивление. Она имеет четко видимые провалы напряжения до нулевого значения, которые служат диагностическим признаком более высокой чувствительности, характеризующим указанную неисправность.

§6 Выводы по главе

В таблице 4.5 приведена характеристика осциллографических методов диагностирования, рассмотренных ранее в пункте 4.5.

Таблица 4.5 – Анализ известных осциллографических методов диагностирования автомобильных генераторов

Показатели оценки эффективности метода	Наименование групп методов			
	С помощью фигур Лиссажу	С помощью тестовых сигналов	Путём усиления пульсации напряжения	Путем сравнения осциллограмм с типовыми
Незначительная трудоёмкость	—	+	—	+
Не требует снятия генератора	—	—/+	+	+
Не требует громоздкой или сложной аппаратуры	—	+	—	+
Не требует сложных вычислений	+	—	—	+
Возможность определения большинства неисправностей	+	—	—	+
Возможность применения в условиях СТО/АТП	—	—/+	+/-	+
Суммарная оценка, +/-	++/- — —	++/- —	+/- — —	+++++

Результаты анализа существующих осциллографических методов диагностирования автомобильных генераторов показали высокую эффективность метода сравнения осциллограмм с типовыми, поэтому актуальной задачей является устранение присущих им недостатков, то есть повышение информативности получаемых осциллограмм.

Глава 5 Выбор и обоснование диагностических параметров автомобильных генераторов

§1 Причинно-следственная связь между элементами и диагностическими параметрами генератора

На сегодняшний день сложилась определённая система выбора диагностического параметра изделий и систем электрооборудования, выполняемая в следующем порядке [41]:

- выявляют наиболее часто повторяющиеся отказы и повреждения по результатам эксплуатации;
- анализируют причинно-следственные связи неработоспособных или исправных элементов изделия и его выходных параметров;
- составляют блок-схему причинно-следственных связей по цепи: агрегат или сборочная единица — сопряжение или элемент — структурный параметр — характер неисправности — симптом — диагностический параметр.

Уровни поиска неисправностей определяем по следующей схеме:

- 1) детали и сборочные единицы, из которых состоит автомобильный генератор;
- 2) сопряжение или элемент генератора, или его сборочных единиц, подвергаемых в процессе эксплуатации воздействию дестабилизирующих факторов (например, температура, влажность и вибрация);

- 3) структурные параметры, характеризующие исправность или работоспособность элементов, или сопряжений генератора;
- 4) возможные состояния неисправности и неработоспособности;
- 5) симптомы состояний неисправности и неработоспособности;
- 6) возможные диагностические параметры, чувствительные к изменению структурных параметров.

Нами предложена блок-схема уровней поиска неисправностей и причинно-следственных связей на примере автомобильных генераторов (рисунок 5.1), которая позволила определить диагностические параметры, чувствительные к изменению структурных параметров.

1-й уровень:

1—1 – подшипники генератора; 1—2 – шкив генератора; 1—3 – ротор генератора в сборе; 1—4 – щёткодержатель со встроенным регулятором напряжения; 1—5 – выпрямительный блок; 1—6 – статор генератора в сборе.

2-й уровень:

2—1 – сопряжение вал ротора – подшипники; 2—2 – сопряжение обмотка ротора – контактные кольца; 2—3 – сопряжение шкив генератора – вал ротора; 2—4 – сопряжение вал ротора – контактные кольца; 2—5 – сопряжение обмотка ротора – корпус ротора; 2—6 – сопряжение щётки – контактные кольца; 2—7 – сопряжение щётки – регулятор напряжения; 2—8 – сопряжение выпрямительный блок – регулятор напряжения; 2—9 – сопряжение обмотка статора – выпрямительный блок; 2—10 – сопряжение обмотка статора – статор.

3-й уровень:

3—1 – посадка подшипников; 3—2 – сопротивление обмотки ротора; 3—3 – посадка шкива; 3—4 – сопротивление изоляции контактных колец; 3—5 – сопротивление изоляции обмотки ротора; 3—6 – сопротивление между щётками и контактными кольцами; 3—7 – целостность соединений внутри щёткодержателя/регулятора напряжения;

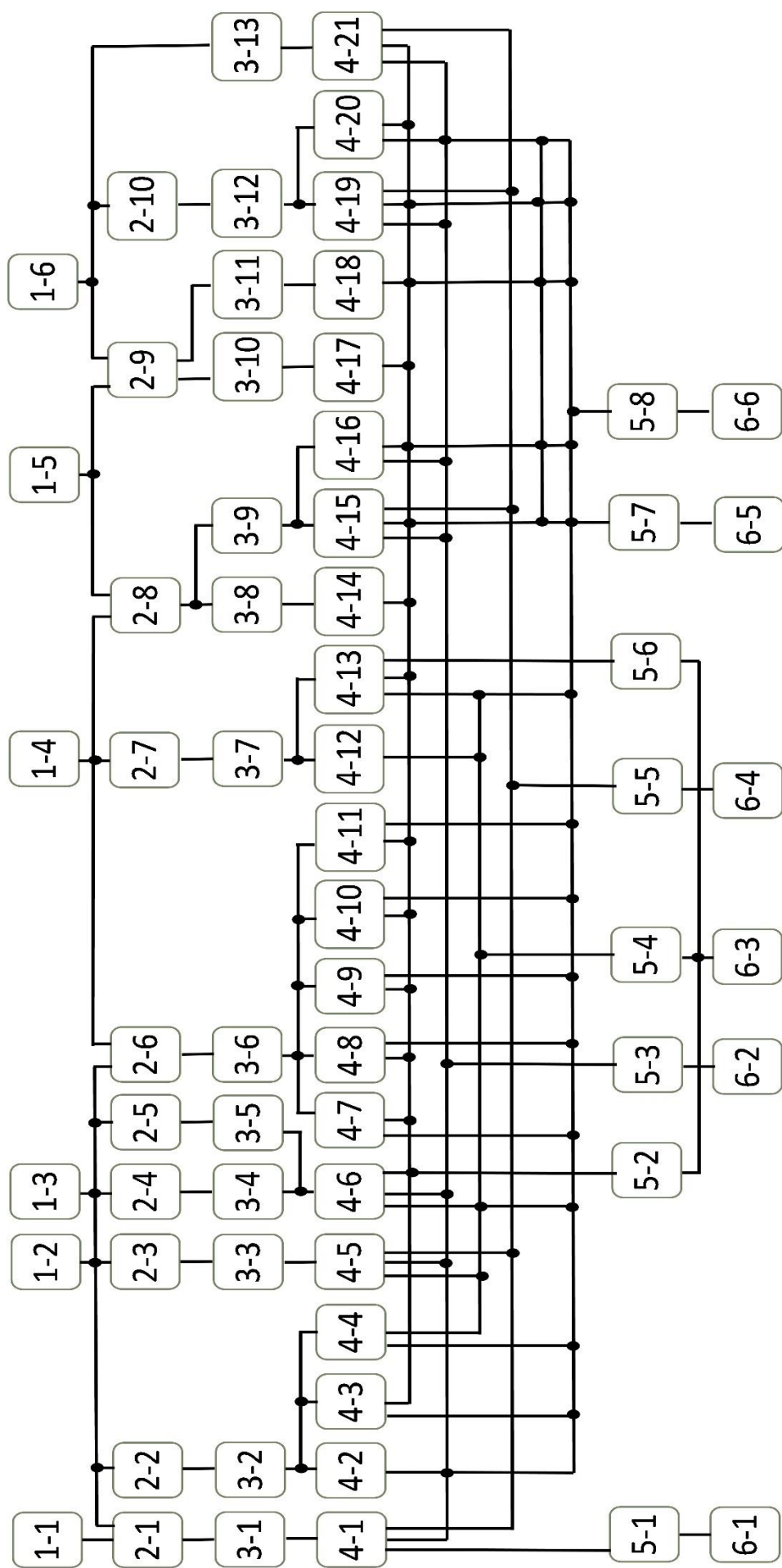


Рисунок 5.1 – Блок-схема причинно-следственных связей и уровни поиска неисправностей генераторов транспортных средств

3—8 – сопротивление между выпрямителем и регулятором напряжения; 3—9 – сопротивление диодов выпрямительного блока; 3—10 – сопротивление между обмотками статора и выпрямительным блоком; 3—11 – сопротивление фаз обмотки статора; 3—12 – сопротивление изоляции обмоток статора; 3—13 – зазор между ротором и статором.

4-й уровень:

4—1 – износ подшипников генератора; 4—2 – межвитковые замыкания обмотки ротора; 4—3 – нарушение контакта в месте пайки выводов обмотки ротора к контактными кольцам; 4—4 – обрыв обмотки ротора; 4—5 – проворачивание шкива; 4—6 – замыкание обмотки ротора на корпус; 4—7 – ослабление пружин щёткодержателя; 4—8 – окисление поверхности контактных колец; 4—9 – замасливание поверхности контактных колец; 4—10 – зависание щёток; 4—11 – износ щёток; 4—12 – обрыв щёточных поводков; 4—13 – отказ регулятора напряжения; 4—14 – нарушение контакта между выпрямительным блоком и регулятором напряжения; 4—15 – пробой диодов выпрямителя; 4—16 – обрыв внутренней цепи диодов выпрямителя; 4—17 – нарушение контакта в месте соединения обмотки статора и выпрямительного блока; 4—18 – обрыв фазных обмоток статора; 4—19 – межвитковые замыкания в обмотках статора; 4—20 – замыкание обмоток статора на корпус; 4—21 – задевание ротора за статор.

5-й уровень:

5—1 – изменение сопротивления подшипников; 5—2 – снижение величины выходного напряжения; 5—3 – повышение температуры генератора; 5—4 – отсутствие выходного напряжения; 5—5 – повышенный шум при работе; 5—6 – повышение величины выходного напряжения; 5—7 – отклонение формы выходного напряжения; 5—8 – изменение параметров магнитного поля.

6-й уровень:

6—1 – сопротивление подшипников; 6—2 – температура генератора; 6—3 – величина выходного напряжения; 6—4 – уровень шума при работе; 6—5 – форма выходного напряжения; 6—6 – величина магнитного поля.

Параметры шестого уровня определяют непосредственно на транспортном средстве без разборки и снятия генератора с двигателя.

Анализ блок-схемы причинно-следственных связей показал, что работоспособность генератора можно характеризовать четырьмя основными диагностическими параметрами: уровнем шума, температурой обмоток, величиной магнитного поля, а также величиной и формой выходного напряжения.

При выборе диагностических параметров необходимо учитывать информативность (возможность определения большинства неисправностей) и оперативность. Уровень шума как диагностический параметр, не обладает достаточной информативностью, а температура – требует временных затрат. Использование параметров внешнего магнитного поля для оценки технического состояния генераторов требует проведения дополнительных исследований.

Поэтому в качестве основных диагностических параметров были приняты величина и форма выходного напряжения, получаемые при осциллографическом диагностировании генераторов.

§2 Характеристика параметров выходного напряжения генератора

Основными параметрами осциллограмм выходного напряжения являются временные и амплитудные значения, указанные на рисунке 5.2.

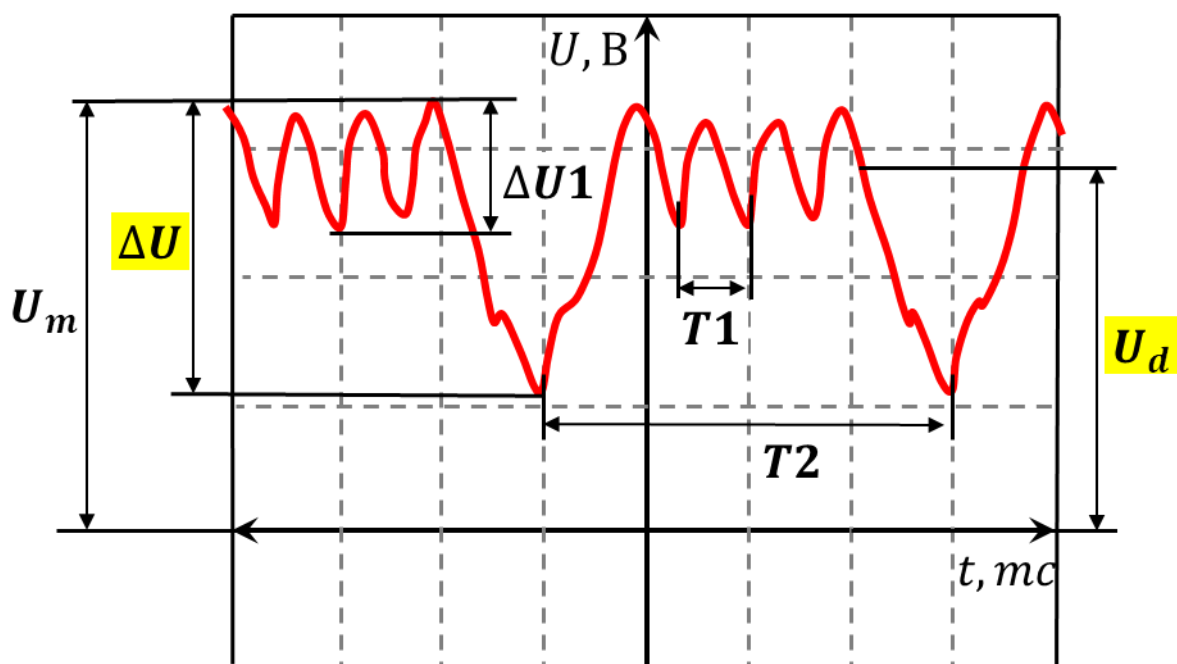


Рисунок 5.2 – Параметры осциллограмм выходного напряжения

Анализируя параметры осциллограммы, можно сделать следующие выводы:

- период следования импульсов T_1 определяется только схемой выпрямления (трехфазная или пятифазная) и не изменяется в процессе работы даже при возникновении неисправностей;
- период T_2 , напротив, появляется в момент возникновения неисправности и зависит только от ее характера (обрыв или замыкание обмотки, пробой диода и т. п.);
- амплитуда напряжения U_m также не изменяется в процессе штатной работы и при большинстве характерных неисправностей, за исключением выхода из строя регулятора напряжения;
- среднее значение напряжения U_d чувствительно к возникновению неисправностей, и уменьшается по мере их развития. Оно также чувствительно к выходу из строя регулятора напряжения;
- размах колебаний напряжения ΔU обладает наибольшей чувствительностью к неисправностям, однако не изменяется при отказе регулятора напряжения;

– размах ΔU_1 специфичен для ряда неисправностей, и также не изменяется в процессе их развития.

На основании проведённого анализа было решено в качестве основных диагностических параметров принять среднее значение напряжения (U_d), как параметр, чувствительный к отказам регулятора напряжения и размах колебаний (ΔU), наиболее чувствительный к остальным неисправностям генераторов.

Выбранные параметры должны отвечать следующим четырём требованиям: чувствительность, однозначность, стабильность и информативность.

Чувствительность диагностического параметра оценивается коэффициентом чувствительности:

$$K = \Delta S / \Delta Y \quad (5.1)$$

где ΔS – изменение диагностического параметра;

ΔY – изменение структурного параметра.

Однозначность диагностического параметра означает, что по измеренному значению диагностического параметра можно определить единственную величину структурного параметра:

$$\Delta S / \Delta Y \neq 0 . \quad (5.2)$$

Стабильность характеризуется вариацией значений диагностического параметра при многократном измерении на генераторах, имеющих одно и то же значение структурного параметра:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=k} n_i \cdot (S_i - \bar{S})^2}{n-1}} \rightarrow \min , \quad (5.3)$$

где n_i – число случаев, в которых наблюдалось измеренное значение диагностического параметра;

n – суммарное количество измерений диагностического параметра;

$\bar{S}$ – среднее арифметическое диагностического параметра;

S_i – текущее значение диагностического параметра.

Информативность параметра определяется на основе анализа кривых распределения диагностических параметров исправных и неисправных объектов.

Для оценки информативности можно использовать величину [49]:

$$K_I = \frac{\bar{S}_2 - \bar{S}_1}{\sigma_1 + \sigma_2}, \quad (5.4)$$

где $\bar{S}_1$ – среднее арифметическое диагностического параметра исправных объектов;

$\bar{S}_2$ – среднее арифметическое диагностического параметра неисправных объектов;

σ_1 – вариация значений диагностического параметра исправных объектов;

σ_2 – вариация значений диагностического параметра неисправных объектов.

Чем выше информативность диагностического параметра, тем на большую величину снижается неопределённость состояния объекта диагностирования при использовании данного диагностического параметра.

Основные характеристики выбранных параметров: информативность, чувствительность, стабильность и однозначность были определены в ходе экспериментальных исследований (часть 4) и приведены в приложении А.

§3 Выводы по главе

Анализ блок-схемы причинно-следственных связей показал, что работоспособность генераторов транспортных средств можно характеризовать четырьмя основными диагностическими параметрами: уровнем шума, температурой обмоток, величиной магнитного поля, а также величиной и формой выходного напряжения. Однако уровень шума как диагностический параметр, не обладает достаточной информативностью, а температура – требует временных затрат. Использование параметров внешнего магнитного поля для оценки технического состояния генераторов требует проведения дополнительных исследований.

Поэтому в качестве основных диагностических параметров были приняты величина и форма выходного напряжения, оцениваемые средним значением (U_d), как параметр, чувствительный к отказам регулятора напряжения и размахом колебаний напряжения (ΔU), наиболее чувствительный к остальным неисправностям генераторов.

Анализ данных параметров показал, что они обладают достаточной чувствительностью, однозначностью (монотонно изменяются без наличия экстремумов при возникновении и развитии неисправностей), стабильностью и высокой информативностью, так как графики плотности распределения диагностических параметров исправных и неисправных генераторов не пересекаются.

Глава 6 Исследование взаимосвязи диагностических и структурных параметров генераторов

В результате проведённого в главе 3 анализа установлено, что ресурс автомобильных генераторов определяется следующими основными неисправностями: обрывами и замыканиями обмоток, обрывом цепи и пробоем диодов выпрямителя, отказами регуляторов напряжения, которые характеризуются изменением соответствующих структурных параметров.

На рисунке 6.1 представлена структурная схема автомобильного генератора, из которой следует, что элементы генератора, связанные потоком электрической (электромагнитной) энергии образуют замкнутый контур. Следовательно, отклонение структурных параметров любого из этих элементов (крайний случай – выход из строя) приведёт к отклонению выходных характеристик генератора. Можно сказать, что генератор обладает последовательной схемой надёжности [41].

§1 Обмотка ротора генератора

Одним из ключевых элементов генератора является обмотка возбуждения, расположенная на роторе. Её назначение – преобразовать подведённое постоянное напряжение в магнитный поток, который за счёт вращения ротора является переменным, как пространстве, так и во времени.

Обмотка ротора характеризуется структурными – масса, размеры, и диагностическими параметрами – сопротивление обмотки, сопротивление изоляции, температура обмотки.

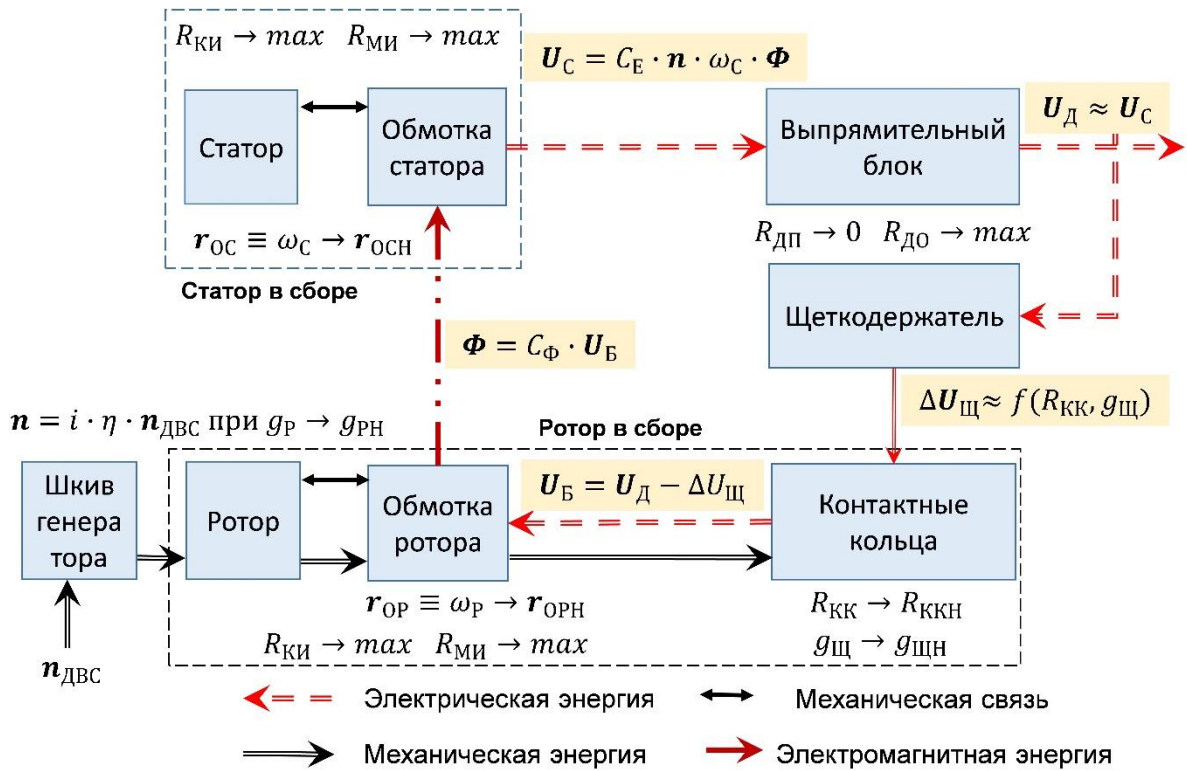


Рисунок 6.1 – Структурная схема автомобильного генератора

Поскольку обмотка ротора предназначена для создания магнитного потока, то можно осуществить следующие аналитические преобразования:

$$\Phi \equiv I \cdot \omega_p; I = U_B / r_{ор}; r_{ор} = \rho \cdot \pi \cdot D_{ср} \cdot \omega_p / q_{пр} \Rightarrow \Phi \equiv U_B \cdot q_{пр} / \rho \cdot \pi \cdot D_{ср} , \quad (6.1)$$

где Φ – магнитный поток, Вб;

I – сила тока обмотки, А;

ω_p – количество витков обмотки;

$r_{ор}$ – сопротивление обмотки ротора, Ом;

U_B – напряжение бортовой сети, В;

ρ – удельное сопротивление проводника, Ом·м;

$D_{ср}$ – средний диаметр витка обмотки, м;

$q_{пр}$ – площадь сечения проводника, м².

Так как параметры ρ , $q_{\text{пр}}$ и $D_{\text{ср}}$ в процессе эксплуатации остаются постоянными, то можно считать, что:

$$\Phi \equiv U_{\text{Б}} . \quad (6.2)$$

Из выражения (6.2) следует, что магнитный поток обмотки ротора не зависит от её сопротивления, в то время как все основные неисправности обмотки приводят к его изменению (межвитковые замыкания, замыкания на корпус, обрыв обмотки).

Важным параметром обмотки ротора является её температура:

$$t_{\text{обм}} = U_{\text{Б}}^2 / r_{\text{ОР}} . \quad (6.3)$$

Если графически представить изменение параметров обмотки в процессе эксплуатации (см. рисунок 6.2), то можно заметить, что первичным является все же изменение сопротивления обмотки, приводящее к росту её температуры и ускорению деструктивных процессов.

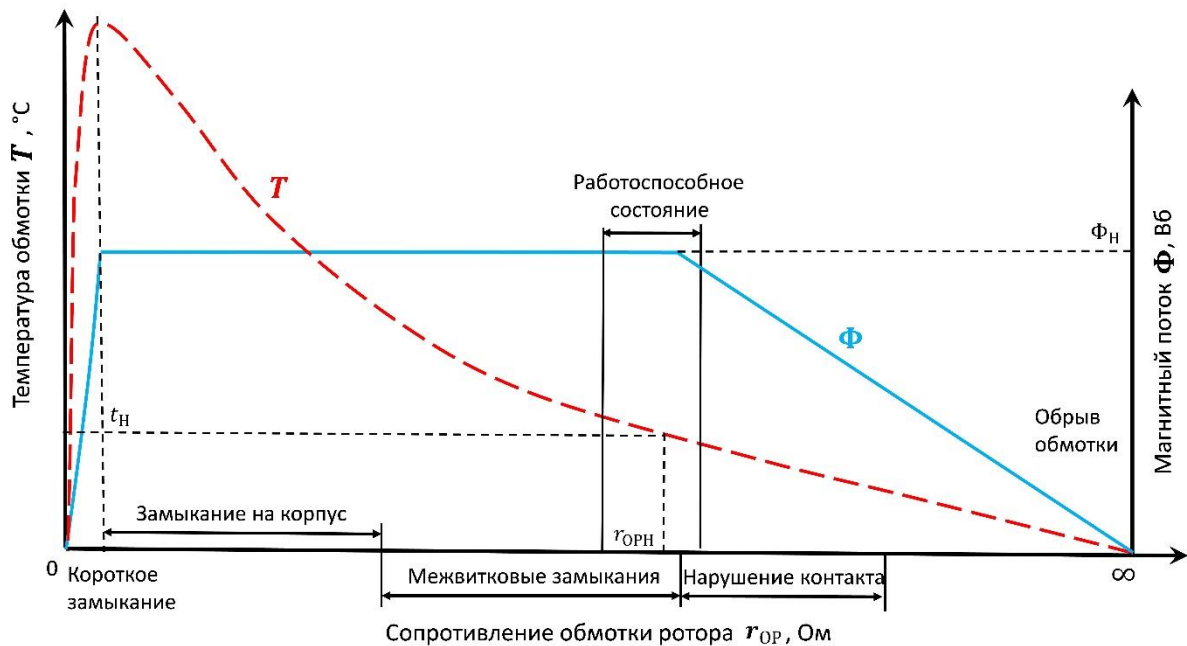


Рисунок 6.2 – Изменение параметров обмотки ротора в процессе эксплуатации

К изменению сопротивления обмотки приводит изменение сопротивления изоляции: межвитковой и корпусной. Графически схема замещения обмотки ротора представлена на рисунке 6.3.

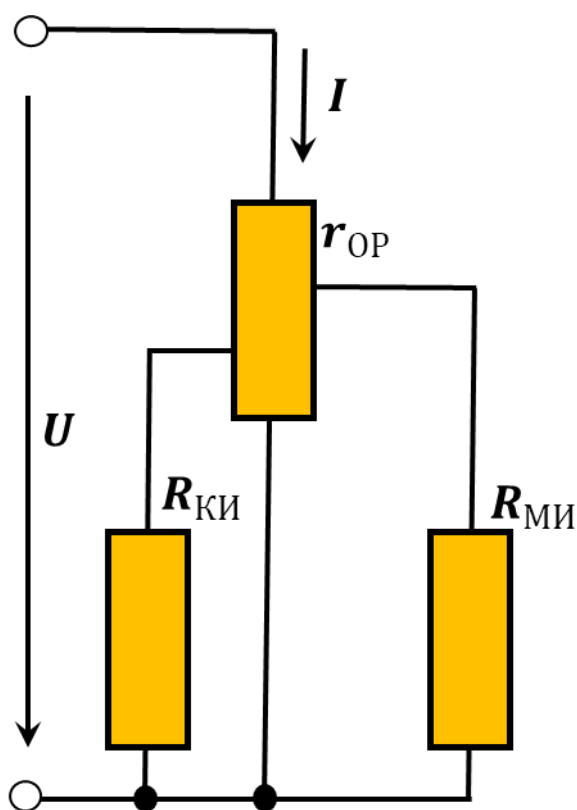


Рисунок 6.3 – Схема замещения обмотки ротора

В исправном состоянии сопротивление корпусной и межвитковой изоляции (десятки мегаОм) намного превышает сопротивление обмотки ротора (единицы Ом) и не оказывает на неё влияние. В случае значительного снижения сопротивления изоляции под действием дестабилизирующих факторов (высокая или низкая влажность, повышенная температура, коррозионные вещества) происходит межвитковое замыкание или замыкание на корпус, приводящее к снижению сопротивления обмотки, как показано на рисунке 6.2.

Исходя из этого, условие работоспособности обмотки ротора:

$$R_{OP} \rightarrow R_{OPнн} \text{ при } R_{КИ}, R_{МИ} \rightarrow \max \Rightarrow \Phi \equiv U_B, \quad (6.4)$$

где $R_{\text{орн}}$ – номинальное сопротивление обмотки ротора, Ом;

$R_{\text{ки}}$ – сопротивление корпусной изоляции, МОм;

$R_{\text{ми}}$ – сопротивление межвитковой изоляции, МОм.

§2 Обмотка статора генератора

Рассмотрим обмотку статора, которая преобразует магнитный поток обмотки ротора в переменное напряжение и характеризуется теми же структурными и выходными параметрами, что и обмотка ротора.

Для обмотки статора справедливо следующее утверждение:

$$U_C \equiv i \cdot \eta \cdot n_{\text{двс}} \cdot \Phi \cdot \omega_C, \quad (6.5)$$

где U_C – переменное напряжение обмотки статора, В;

ω_C – число витков обмотки статора;

i – передаточное отношение шкив генератора – шкив коленчатого вала;

η – КПД ремённой передачи;

$n_{\text{двс}}$ – частота вращения коленчатого вала ДВС, мин⁻¹.

Таким образом, магнитный поток генератора в процессе эксплуатации практически не изменяется, следовательно, можно считать, что на величину напряжения, вырабатываемого обмоткой статора, оказывает влияние число витков самой обмотки, которое может снизиться при межвитковых замыканиях, замыканиях на корпус и межфазных замыканиях, и частота вращения ротора, уменьшающаяся при недостаточном натяжении ремня.

Практически можно считать, что:

$$r_{\text{ос}} \equiv \omega_C. \quad (6.6)$$

где r_{OC} – сопротивление обмотки статора, Ом.

Избыточное натяжение ремня может привести к ускоренному выходу из строя подшипников (особенно переднего).

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Если } g_P = g_{PH} \rightarrow n = i \cdot \eta \cdot n_{ДВС} \\ \text{Если } g_P < g_{PH} \rightarrow n < i \cdot \eta \cdot n_{ДВС} \rightarrow U_C \downarrow \Rightarrow \text{ремень проскальзывает} \\ \text{Если } g_P > g_{PH} \rightarrow n = i \cdot \eta \cdot n_{ДВС} \rightarrow t_{\Pi} \uparrow, R_{\Pi} \downarrow \Rightarrow \text{ремень перетянут} \end{array} \right. \quad (6.7)$$

где g_P – текущее натяжение ремня, Н;

g_{PH} – нормальное натяжение ремня, Н;

t_{Π} – температура подшипника, °С;

R_{Π} – ресурс работы подшипника, ч.

Исходя из этого, условие работоспособности обмотки статора:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_C = f(\Phi, r_{OC}, n_{ДВС}) \\ r_{OC} \rightarrow r_{OCH} \text{ при } R_{КИ}, R_{МИ} \rightarrow \max \\ n = i \cdot \eta \cdot n_{ДВС} \text{ при } g_P = g_{PH} \end{array} \right. \quad (6.8)$$

§3 Выпрямительный блок и щеткодержатель генератора

Следующим узлом, согласно структурной схеме (рисунок 6.1), является выпрямительный блок, преобразующий переменное напряжение обмотки статора в постоянное напряжение бортовой сети.

Выпрямительный блок представляет собой последовательно-параллельное соединение группы полупроводниковых диодов (как правило, не меньше шести), причём сопротивление каждого диода может принимать значения в широком диапазоне: от 0,1 Ом при пропускании тока в прямом направлении до 10 кОм – в обратном.

На рисунке 6.3 показано графическое представление зависимости технического состояния диодов от их внутреннего сопротивления.

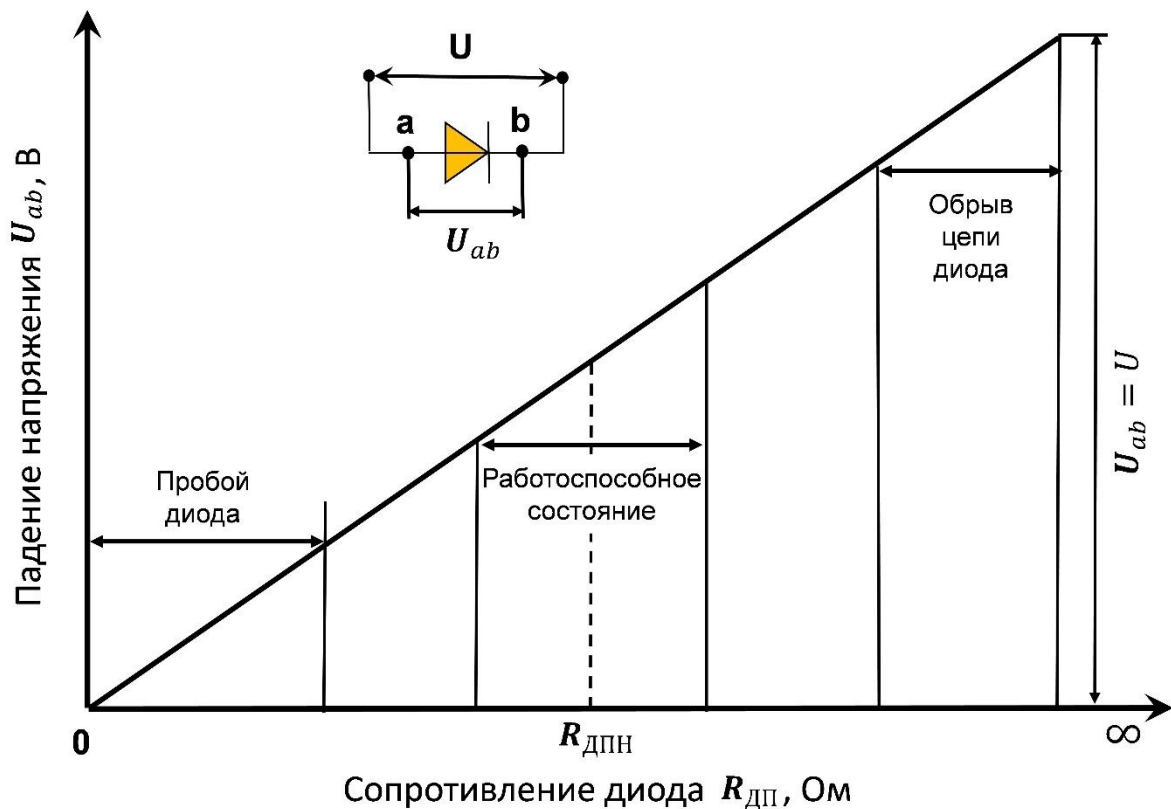


Рисунок 6.3 – Изменение сопротивления диода в процессе эксплуатации

Напряжение на выходе выпрямительного блока определяется величиной электрического сопротивления диодов:

$$U_d = f(U_c, R_d), \quad (6.9)$$

где U_d – напряжение на выходе выпрямительного блока, В;

R_d – сопротивление диодов, Ом.

Замыкающим структурную схему элементом является щёткодержатель, связывающий выпрямительный узел и обмотку ротора.

Если генератор находится в исправном состоянии, наблюдается равенство напряжений:

$$U_{\text{щ}} = U_{\text{Б}} = U_{\text{д}} - \Delta U_{\text{щ}}, \quad (6.10)$$

где $U_{\text{щ}}$ – напряжение на выходе щёткодержателя, В;

$\Delta U_{\text{щ}}$ – падение напряжения в щёткодержателе, В.

В общем случае падение напряжения в щёткодержателе можно выразить следующим образом:

$$\Delta U_{\text{щ}} = f(R_{\text{щ}}); R_{\text{щ}} = f(g_{\text{щ}}, R_{\text{кк}}) \Rightarrow \Delta U_{\text{щ}} \equiv g_{\text{щ}}, R_{\text{кк}}, \quad (6.11)$$

где $R_{\text{щ}}$ – сопротивление цепи щёткодержатель-обмотка ротора, Ом;

$g_{\text{щ}}$ – сила прижатия щёток, Н;

$R_{\text{кк}}$ – сопротивление контактных колец, Ом.

Основными неисправностями щеткодержателя, обуславливающими увеличение разности напряжений, являются:

$$\begin{cases} g_{\text{щ}} < g_{\text{щн}} \rightarrow \text{плохой контакт} \\ g_{\text{щ}} = 0 \rightarrow \text{зависание щёток} \Rightarrow U_{\text{щ}} = U_{\text{Б}} = 0 \\ R_{\text{кк}} > R_{\text{ккн}} \rightarrow \text{окисление контактных колец} \end{cases} \quad (6.12)$$

Таким образом, условие работоспособности генератора при работе на холостом ходу (при отсутствии тока нагрузки) будет выглядеть следующим образом:

$$r_{\text{ос}} \rightarrow r_{\text{осн}}; R_{\text{дп}} \rightarrow 0; R_{\text{до}} \rightarrow \infty; g_{\text{щ}} \rightarrow g_{\text{щн}}; R_{\text{кк}} \rightarrow R_{\text{ккн}} \Rightarrow U_{\text{Б}} \equiv n, \quad (6.13)$$

где $R_{\text{дп}}$ – сопротивление диода при прямом включении, Ом;

$R_{\text{до}}$ – сопротивление диода при обратном включении, Ом.

§4 Аналитическое описание взаимосвязи структурных и диагностических параметров генераторов

Ограничения, перечисленные в выражении (6.13) являются структурными параметрами, характеризующими работоспособность элементов генератора. Структурные параметры «сила прижатия щёток» и «сопротивление контактных колец» в процессе работы генератора эквивалентны увеличению сопротивления обмотки ротора, поэтому именно этот параметр был выбран в качестве структурного.

Таким образом, аналитические исследования, направленные на установление взаимосвязи структурных и диагностических параметров позволили установить, что величина выходного напряжения обусловлена величиной электрического сопротивления обмотки статора (r_{OC}), полупроводниковых диодов (R_D) и обмотки ротора (r_{OP}) генераторов транспортных средств.

Для определения характера взаимосвязи структурных и диагностических параметров воспользуемся известным выражением [48]:

$$U_d = U_\phi \cdot k_{cx} \cdot k_b \cdot k_\gamma - \Delta U_{\text{ПР}}, \quad (6.14)$$

где U_ϕ – напряжение (ЭДС) фазы генератора, В;

k_{cx} – коэффициент схемы выпрямления $k_{cx} = 2\cos\psi = 2\cos(\pi/2m)$;

m – число фаз выпрямителя (генератора), $m = 3$;

k_b – коэффициент выпрямления $k_b = (2m\sqrt{2}/\pi) \cdot \sin(\pi/2m)$;

k_γ – коэффициент, учитывающий коммутацию $k_\gamma = (1 + \cos\gamma)/2$;

γ – угол коммутации, град. Согласно [48] $\gamma = 15^\circ$.

$\Delta U_{\text{ПР}}$ – прямое падение напряжения на диоде, В.

$$\Delta U_{\text{пр}} = U_0/2 + I \cdot R_{\text{дп}} , \quad (6.15)$$

где U_0 – пороговое напряжение, $U_0 = 0,6 - 0,8$ В;

I – сила тока генератора, А.

Проведя вычисления и подставив значения в выражение (6.14), получим:

$$U_d = 2,3 \cdot U_{\phi} .$$

При холостом ходе напряжение, индуцируемое в обмотке статора:

$$U_{\phi} = 4 \cdot k_{\phi} \cdot k_o \cdot \left(\frac{p \cdot n}{60}\right) \cdot \omega_{\phi} \cdot \Phi , \quad (6.16)$$

где k_{ϕ} – коэффициент, зависящий от формы кривой поля, $k_{\phi} = 1,11$;

p – количество пар полюсов генератора, $p = 6$;

ω_{ϕ} – количество витков в фазе;

k_o – обмоточный коэффициент.

Подставляя в (6.14) значения напряжения фазы и потерь в выпрямителе получаем следующее выражение:

$$U_d = 2,3 \cdot 4,44 \cdot \left(\frac{p \cdot n}{60}\right) \cdot \frac{r_{\text{ос}} \cdot q_{\text{пр}}}{\rho \cdot D_{\text{ср}}} \cdot C_e - 2 \cdot (U_0/2 + I \cdot R_{\text{дп}}) , \quad (6.17)$$

где C_e – постоянный коэффициент, определяемый параметрами обмотки ротора.

Так как сила тока генератора обратно пропорциональна сопротивлению обмотки статора и диодов выпрямителя, и, учитывая необходимость выделения взаимосвязи структурных и диагностических параметров, приведём выражение (6.17) к следующему виду:

$$U_d = \varphi_1 \cdot r_{OC} - \varphi_2 \cdot R_{дп} / (r_{OC} + R_{дп}), \quad (6.18)$$

где φ_1, φ_2 – коэффициенты, не зависящие от r_{OC} и $R_{дп}$, определяемые скоростным и нагрузочным режимами работы генератора соответственно.

Размах колебаний напряжения генератора согласно [48] имеет вид:

$$\Delta U = \sqrt{2} \cdot U_{\phi} \cdot 2 \cos \psi \cdot (1 - \cos \gamma \cdot \cos \psi), \quad (6.19)$$

где ΔU – размах колебаний напряжения генератора, В.

Учитывая характер изменения размаха колебаний напряжения при возникновении электрических неисправностей, перепишем выражение (6.19) в виде:

$$\Delta U = \mu_1 - \mu_2 \cdot U_d, \quad (6.20)$$

где μ_1, μ_2 – коэффициенты, определяемые техническим состоянием генератора.

Из выражений (6.18) и (6.20) следует, что возникновение неисправностей, связанных с изменением электрического сопротивления обмотки статора и полупроводниковых диодов, приводит к уменьшению среднего значения и росту размаха колебаний выходного напряжения, что подтверждает обоснованность выбора диагностических параметров. Так как согласно выражению (6.20) величина ΔU зависит от среднего значения напряжения U_d , то окончательно примем размах колебаний напряжения в качестве основного диагностического параметра.

Для осуществления процедур диагностирования необходимо определить нормативные значения принятого диагностического параметра, сопоставляя которые с текущим значением делают заключение о техническом состоянии автомобильных генераторов.

§5 Выводы по главе

На основании разработанных аналитических выражений, связывающих диагностические и структурные параметры обмоток ротора и статора, выпрямительного блока и щёткодержателя установлено, что основным структурным параметром, определяющим техническое состояние автомобильных генераторов, является электрическое сопротивление. Возникновение неисправностей, связанных с изменением электрического сопротивления обмотки статора и полупроводниковых диодов, приводит к уменьшению среднего значения и росту размаха колебаний выходного напряжения, что подтверждает обоснованность выбора диагностических параметров.

Часть 3 Разработка математической модели остаточного ресурса генератора

Глава 7 Прогнозирование остаточного ресурса

§1 Методы прогнозирования остаточного ресурса

В области диагностирования машин прогнозирование используют для предсказания изменения параметров технического состояния сопряжений, сборочных единиц и агрегатов, в частности износа деталей и сопряжений в будущем.

Под остаточным ресурсом понимается продолжительность работы (наработка) сопряжения, сборочной единицы или агрегата после диагностирования до их предельного состояния, характеризуемого предельным износом, снижением качества работы, экономичности машины или требованиями безопасности. Другими словами, остаточный ресурс — это пробег (срок) диагностируемого сопряжения, сборочной единицы, агрегата до момента достижения их параметров состояния предельной величины.

Выполнить достоверное прогнозирование можно только в том случае, когда известны условия, в которых объект будет применяться. При этом под условиями понимаются: режимы использования, характер нагрузки, внешние факторы (температура, влажность и т. п.).

При этом изменения параметров случайные для одного объекта, имеют устойчивый статистический характер для группы объектов. Причем явно выражена тенденция к монотонности и плавности, что является одной из решающих предпосылок для прогнозирования. Прогнозирование возможно, если в случайном процессе, характеризующем изменение

параметра, можно выделить тренд (англ. *trend* – тенденция, уклон), т. е. принципиальной основой прогнозирования служит предположение о существовании единых закономерностей, определяющих износ или старение.

При прогнозировании в большинстве случаев измерить время безотказной работы нельзя, поэтому важно определить диагностический параметр, то есть такую величину, которая адекватно отражает выработку ресурса объекта диагностирования или появление дефекта, приводящего к потере его работоспособности.

Прогнозирование подразделяется по назначению — на индивидуальное (для конкретного объекта) и групповое (для партии однотипных объектов), по времени прогнозирования — на локальное (время прогноза незначительное) и глобальное (до потери работоспособности).

По способу обработки результатов обследования и принципу принятия решения метод индивидуального прогнозирования можно разделить на методы, использующие для принятия решения результаты:

- только последнего определения состояния механизма (методы прогнозирующего контроля);
- не только последнего, но и предшествующих определений состояния.

Наиболее известны следующие методы прогнозирования:

- по допустимому уровню вероятности безотказной работы объекта диагностирования;
- по результатам экстраполяции изменения параметра в функции наработки;
- экономико-вероятностный по совокупности реализаций параметров;
- имитационное моделирование.

Задачи вероятностного прогнозирования сводятся к определению вероятности невыхода (выхода) прогнозируемого процесса за установленные границы.

При вероятностном прогнозировании необходимо для каждого временного сечения определить закон распределения значений параметра, поэтому требуется выборка около 30 – 50 однотипных объектов диагностирования. За счет большой вариации функции вероятности для отдельных экземпляров машин этот метод недостаточно точен и не экономичен.

При экстраполяции реализуется принцип переноса на будущее тенденций прошлого. При этом изменение состояния объекта диагностирования определяется значениями детерминированных или вероятностных характеристик состояния объекта на основе данных, получаемых на участке наблюдения. Процедура прогнозирования включает анализ результатов наблюдения, построение аналитического выражения, связывающего результаты наблюдения (интерполяцию) и, соответственно, экстраполяцию с помощью полученного выражения.

При выборе математического аппарата для решения задачи аналитического прогнозирования необходимо предварительно определить диагностические параметры. Оценить параметры каждого элемента, входящего в объект, технически сложно из-за их большого количества, поэтому стараются выбрать минимум (в пределе — один) диагностических параметров, обеспечивающий требуемую достоверность прогнозирования изменения состояния объекта.

Метод заключается в прогнозировании остаточного ресурса с учетом предельных или допускаемых значений параметра, характера индивидуального изменения в прошлом, а также характера изменения параметров совокупности однотипных агрегатов, узлов или сопряжений. Считают, что изменение диагностического параметра характеризуется

экстраполяционной функцией и средним квадратическим отклонением от фактического значения.

Информация о среднестатистическом изменении диагностического параметра может быть представлена в виде веерных кривых (рисунок 7.1) описываемых степенной функцией вида:

$$S_i = S_H + V_C \cdot L^\alpha \quad (7.1)$$

где S_i – текущее значение диагностического параметра;

L – наработка объекта диагностирования, тыс. км;

S_H – номинальное значение диагностического параметра;

V_C – коэффициент, характеризующий скорость изменения диагностического параметра;

α – показатель степени функции, аппроксимирующей изменение диагностического параметра.

Коэффициент α в выражении (7.1) постоянен для всей совокупности одноименных элементов, а коэффициент V_C различен (на рисунке 7.1 коэффициент V_C^1 характеризует тяжелые условия эксплуатации, а V_C^4 – самые легкие).

Если изменение диагностического параметра можно представить в виде кривой (пунктирная линия на рисунке 7.1), то остаточный ресурс будет определяться разностью между наработкой в момент диагностирования (точка А) и наработкой при достижении предельного значения диагностического параметра (точка Б):

$$L_{\text{ост}} = L_{\text{пд}} - L_i \quad (7.2)$$

где $L_{\text{пд}}$ – наработка, соответствующая предельному значению диагностического параметра, тыс. км.

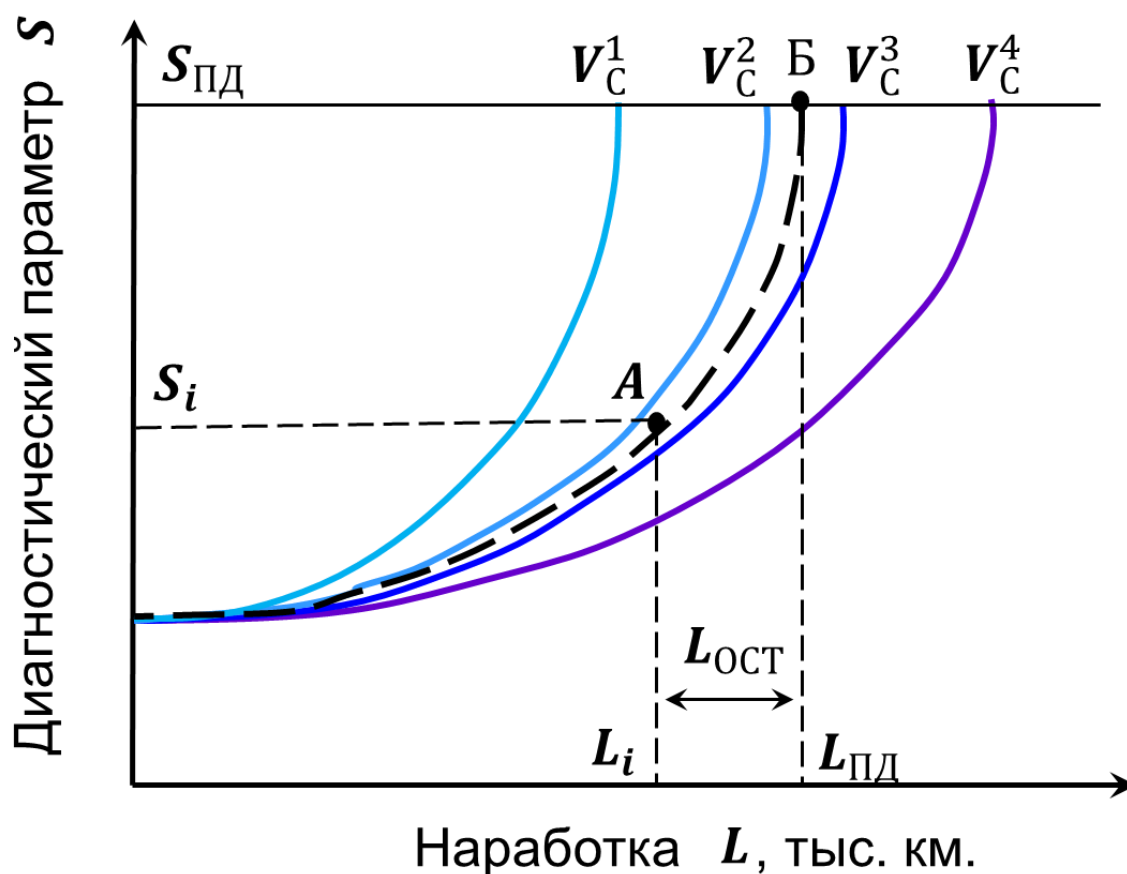


Рисунок 7.1 – Схема прогнозирования по среднестатистическому изменению параметра

Применительно к постепенно изменяющимся параметрам технического состояния машин для определения остаточного ресурса следует использовать формулу:

$$L_{\text{ОСТ}} = L_{\text{Д}} \cdot \left[\sqrt{\alpha(S_{\text{ПР}} - S_{\text{Н}})/(S_i - S_{\text{Н}})} - 1 \right] \quad (7.3)$$

где $L_{\text{Д}}$ – наработка на момент диагностирования, тыс. км;

$S_{\text{ПР}}$ – предельное значение диагностического параметра.

Отличием метода прогнозирования ресурса по реализации является наличие информации о значениях диагностического параметра для разной величины наработки (точки $L_1 - S_1, L_2 - S_2, \dots L_i - S_i$, рисунок 7.2).

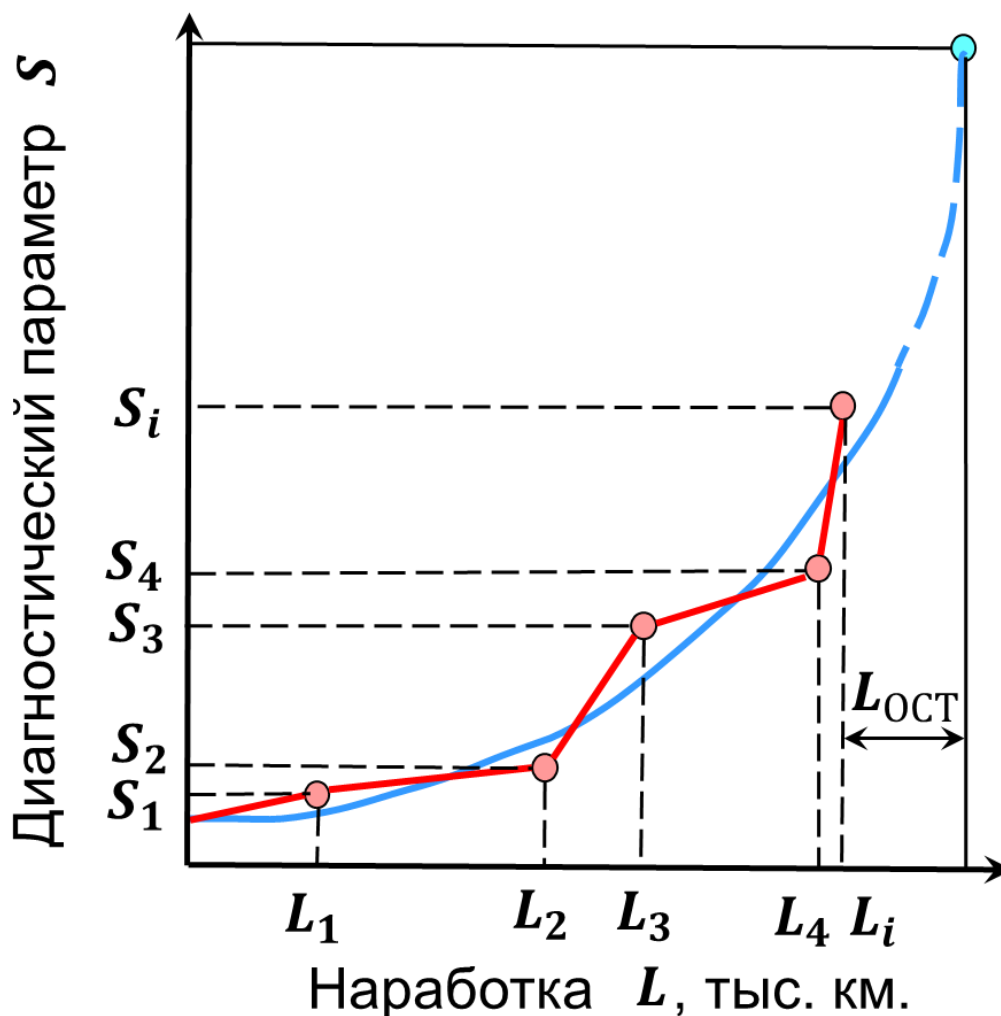


Рисунок 7.2 – Прогнозирование остаточного ресурса по реализации

На основании этих данных делается предположение о характере кривой, описывающей зависимость диагностического параметра от наработки (сплошная кривая, рисунок 7.2), и дальнейшая экстраполяция данных (пунктирная кривая, рисунок 7.2) с целью определения момента достижения диагностическим параметром предельного значения.

Экономико-вероятностный метод прогнозирования остаточного ресурса, предложенный В.М. Михлиным [30], заключается в оптимизации остаточного ресурса по критерию суммарных удельных затрат $C(L_{\text{ост}}, S_{\text{п}})$ на ремонт, профилактику и диагностирование.

Реализация данного метода возможна путем составления и применения номограмм, полученных при оптимизации решений на ЭВМ [30].

Метод экстраполяционных полиномов.

Идеальным случаем решения задачи является адекватное описание изменения функции $S(t)$ каким-либо аналитическим выражением. В общем случае можно использовать многочлен вида:

$$S(t) = \sum_{i=0}^k a_i \cdot \varphi_i(t) \quad (7.4)$$

где a_i – неизвестные коэффициенты;

$\varphi_i(t)$ – известные функции простейшего вида.

Метод регрессионного анализа.

Основывается на использовании уравнения регрессии вида:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i \cdot x_i + \varepsilon \quad (7.5)$$

где y – величина, характер изменения которой необходимо определить;

β_0 – постоянная величина;

β_i – коэффициенты;

x_i – параметры, влияющие на прогнозируемую величину;

ε – случайная погрешность.

Модель изменения диагностического параметра S во времени на основе регрессионного анализа имеет вид:

$$S = S_0 + t/\sigma \quad (7.6)$$

где S_0 – начальное значение параметра;

σ – коэффициент регрессии, определяющий наклон прямой.

Очевидно, что время работы объекта диагностирования будет определяться допустимым значением диагностического параметра:

$$t_{\text{отк}} = (S_{\text{доп}} - S_0) \cdot \sigma \quad (7.7)$$

Очевидным недостатком расчета тренда по линейной регрессии является принимаемая гипотеза о его линейности, так как на практике диагностические параметры могут изменяться по экспоненциальному закону или иметь насыщение.

Общим недостатком вышеуказанных методов прогнозирования является то, что они учитывают только значение диагностического параметра, а изменение условий эксплуатации (разное для каждого объекта диагностирования) не учитывается. Это приводит к снижению точности прогноза и возникновению ошибок первого (ложная неисправность) и второго рода (пропуск отказа).

В работах основоположника теории приспособленности автомобиля к условиям эксплуатации, д.т.н., проф. Л. Г. Резника [37] приводится математическая модель, описывающая влияние на остаточный ресурс агрегатов автомобиля температуры окружающего воздуха:

$$u = u_0 + S_t \cdot (t - t_0)^2 \quad (7.8)$$

где u – средняя интенсивность расходования ресурса;

S_t – параметр чувствительности к изменению температуры окружающего воздуха;

u_0 – оптимальная интенсивность расходования ресурса;

t, t_0 – соответственно текущее и оптимальное значение температуры окружающего воздуха.

Учитывая то, что согласно главе 2, температура окружающего воздуха является комплексным фактором, учитывающим неблагоприятное

воздействие окружающей среды и режимов эксплуатации на работоспособность автомобильных генераторов, то примем уравнение (7.8) в качестве основы для разработки математической модели остаточного ресурса.

Изменение ресурса с увеличением наработки, согласно Л. Г. Резнику:

$$u = u_{\pi} + S_L \cdot L \quad (7.9)$$

где S_L – параметр чувствительности к изменению длительности эксплуатации;

u_{π} – значение интенсивности расходования ресурса по окончании этапа приработки.

Тогда двухфакторная модель, определяющая остаточный ресурс с учётом изменения температуры окружающего воздуха и длительности эксплуатации, может быть представлена в виде:

$$I_{\text{пр}} = I_{\text{н}} + \{a_0 + a_1 \cdot [(\bar{t} - t_0)^2 + \sigma_t^2] + a_2 \cdot (L_{\text{н}} + \Delta L/2)\} \cdot \Delta L \quad (7.10)$$

где $I_{\text{пр}}$ – прогнозируемая величина износа;

$I_{\text{н}}$ – начальное значение износа;

a_0, a_1, a_2 – коэффициенты модели;

$L_{\text{н}}$ – начальное значение пробега, тыс. км;

ΔL – интервал наработки, тыс. км;

σ_t^2 – среднеквадратическое отклонение температуры.

§2 Определение нормативных значений диагностических параметров

Для определения технического состояния автомобильных генераторов необходимо знать нормативные значения структурных и диагностических параметров. К нормативным значениям параметров относятся номинальные S_N , допустимые $S_{доп}$ и предельные $S_{пр}$ значения.

Номинальное (начальное) значение параметра соответствует новым, технически исправным генераторам.

Предельное значение параметра соответствует наличию в генераторе одной или нескольких неисправностей заключительной стадии развития.

Допустимое значение параметра представляет собой ужесточённое предельное значение, при котором дальнейшая эксплуатация генераторов становится нецелесообразной.

Разработкой методов нормирования значений диагностических параметров занимались Ф.Н. Авдонькин, И. Н. Аринин, А.Д. Борц, В. С. Малкин, Л. В. Мирошников, Г.В. Спичкин, А.М. Харазов и другие.

Наибольшую распространённость получило определение допустимых значений диагностических параметров на основании статистического метода, учитывающего вероятностные процессы изменения технического состояния объектов диагностирования. По мнению авторов [29]: «использование статистических данных позволяет учесть техническую, экономическую и конъюнктурную стороны производства. Таким образом, статистическое определение и последующая корректировка диагностического норматива для большинства механизмов автомобиля является основой оптимального диагностирования».

Сущность статистического метода определения допустимого значения диагностического параметра состоит в следующем: в эксплуатации находятся исправные и неисправные генераторы (последних

>20%). Если произвести выборку значений диагностического параметра, то величины диагностических параметров, соответствующие исправному состоянию, будут иметь рассеивание вблизи его наилучшего значения.

Все величины, принадлежащие неисправным генераторам, выйдут за пределы рассеивания параметров исправных генераторов. Зная закон распределения параметров, можно отсечь остальные параметры, выходящие за пределы этого закона. Полученный таким образом интервал (наибольшее его значение) и будет определять допустимое значение диагностического параметра.

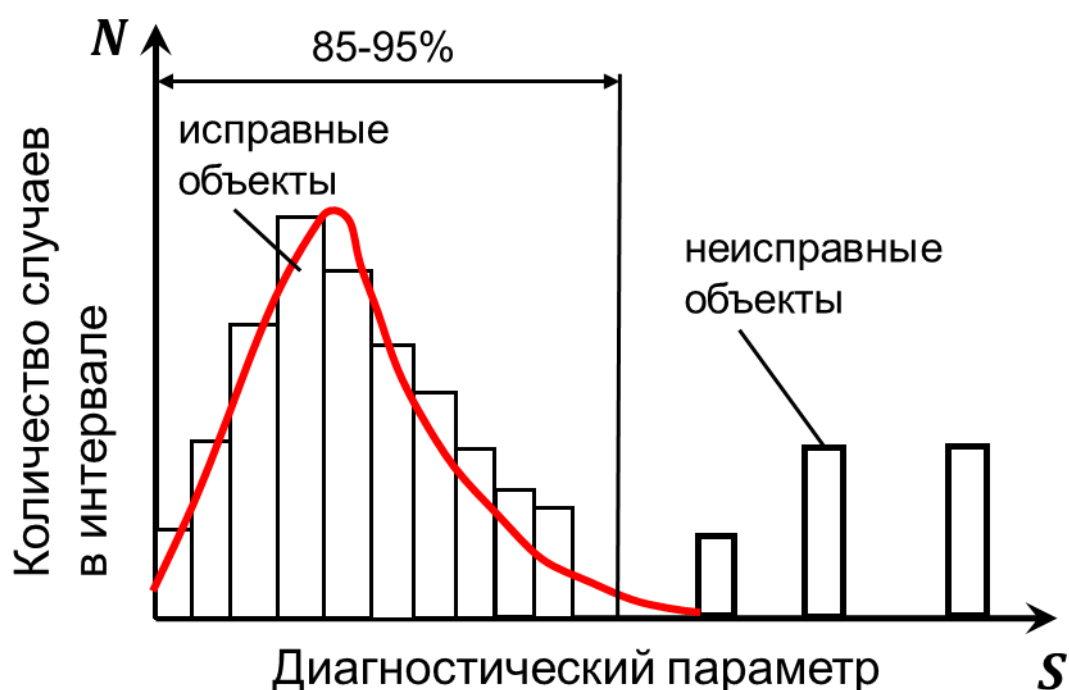


Рисунок 7.3 – Схема определения $S_{\text{ПР}}$ статистическим методом

Определение предельно-допустимого значения $S_{\text{ПР}}$ диагностического параметра проводится на основе выделения толерантных границ по формуле:

$$S_{\text{ПР}} = \bar{S} + K \cdot \sqrt{\sigma^2}, \quad (7.11)$$

где $\bar{S}$ и σ^2 – выборочное среднее значение и дисперсия диагностического параметра;

K – коэффициент, определяемый диагностическим параметром.

Так как диагностический параметр – размах колебаний напряжения является односторонним, ограниченным сверху, то коэффициент K принимают равным $K = 1$, если параметр непосредственно связан с безопасностью движения, и $K = 1,7$, если не связан [28]. Подставляя значения, приведённые в приложении В, получим допустимое значение размаха колебаний выходного напряжения:

$$S_{\text{пр}} = 4,37 + 1,7 \cdot 1,98 = 7,74 \text{ В}$$

Второй способ назначения диагностических параметров предполагает оценку изменения функциональности исследуемого объекта. Так полная потеря способности выполнять основную функцию является критерием отказа объекта, а параметры, обуславливающие возникновение такого события – предельно допустимыми диагностическими параметрами.

Критерием отказа автомобильного генератора является снижение выходного напряжения до уровня, при котором становится невозможным заряд аккумуляторной батареи. Эксплуатация батареи, заряженной менее чем на 50%, запрещена, следовательно, выходное напряжение генератора должно удовлетворять соотношению:

$$U_d^{\text{доп}} \leq U_{\text{АКБ}}^{50\%} = 12,2 \text{ В} \quad (7.12)$$

Определение предельных и предельно-допустимых значений размаха колебаний выходного напряжения на основе результатов экспериментальных исследований, выполненных в главе 10 представлено в приложении Д.

Установленное экспериментально предельно-допустимое значение размаха колебаний выходного напряжения составило $S_{\text{ПР}} = 7,4 \text{ В}$, что подтверждает данные расчетного метода.

Помимо нахождения нормативных значений диагностического параметра для эффективного управления техническим состоянием автомобильных генераторов необходимо определить периодичность проведения диагностирования.

§3 Выводы по главе

Анализ существующих методов прогнозирования остаточного ресурса показал, что они не позволяют учитывать изменение факторов условий эксплуатации конкретного объекта диагностирования, что снижает точность определения остаточного ресурса.

Так как температура окружающего воздуха является комплексным фактором, учитывающим неблагоприятное воздействие окружающей среды и режимов эксплуатации на работоспособность автомобильных генераторов, то в качестве основы для разработки математической модели примем модель интенсивности расходования ресурса Л. Г. Резника.

На основе результатов экспериментальных исследований с помощью метода выделения толерантных границ определено предельно-допустимое значение размаха колебаний выходного напряжения, величина которого составила $\Delta U = 7,74 \text{ В}$.

Глава 8 Математическая модель остаточного ресурса автомобильных генераторов с учетом условий эксплуатации

§1 Математическая модель интенсивности изменения ресурса от факторов эксплуатации

При прогнозировании остаточного ресурса автомобильного генератора рассмотрим его как систему (см. рисунок 8.1). При этом все переменные величины, характеризующие систему, разделим на:

- входные параметры $X_1, X_2, \dots, X_n$, характеризующие внешние условия (дорожные, погоднo-климатические условия, объемы и методы технического обслуживания);
- внутренние переменные состояния $W_1, W_2, \dots, W_n$, характеризующие свойства системы (ток нагрузки, температура обмоток, уровень вибрации и др.);
- выходные переменные $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$, характеризующие реакцию на внешние воздействия (величина и размах колебаний выходного напряжения, уровень шума и др.).

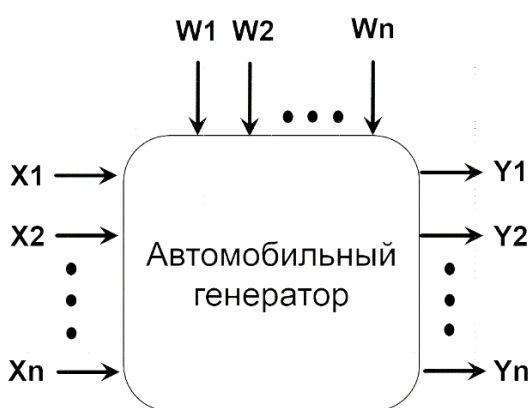


Рисунок 8.1 – Автомобильный генератор как система

В результате проведенного в главе 6 анализа установлено, что ресурс работы генератора обусловлен электрическими сопротивлениями его

элементов, изменение которых определяется температурой t , продолжительностью эксплуатации L , технологическими Φ_T и эксплуатационными Φ_Σ факторами.

$$U_s = f(t, L, \Phi_T, \Phi_\Sigma), \quad (8.1)$$

где U_s – интенсивность изменения ресурса.

При получении аналитической зависимости интенсивности изменения ресурса автомобильного генератора от факторов условий эксплуатации исходим из следующего положения:

$$\overline{U_s} = 1/(S_{\text{пр}} - S_T), \quad (8.2)$$

где $S_{\text{пр}}$ – предельное значение диагностического параметра, В;

S_T – текущее значение диагностического параметра, В;

$\overline{U_s}$ – средняя величина интенсивности изменения ресурса, %.

Таким образом, по своему смыслу $\overline{U_s}$ является обобщенным показателем интенсивности изменения электрического сопротивления элементов автомобильного генератора.

Аналитическое выражение определения остаточного ресурса автомобильного генератора на i -том участке упреждения имеет смысл при выполнении следующего условия – текущее значение диагностического параметра S_T в период контроля не должно превышать его предельного значения $S_{\text{пр}}$, то есть:

$$S_T(l_{i+1}) \leq S_{\text{пр}}(l_{i+1}) \quad (8.3)$$

Функциональная зависимость интенсивности изменения ресурса от температуры окружающего воздуха и длительности эксплуатации, на

основании анализа ранее выполненных исследований, может быть представлена следующими уравнениями:

$$U_s = \beta_1 + \beta_2 t - \beta_3 \cdot t^2 \quad (8.4)$$

$$U_s = \gamma_1 + \gamma_2 \cdot L \quad (8.5)$$

где $\gamma_1, \gamma_2 = f(t)$; $\beta_1, \beta_2, \beta_3 = f(L)$ – относительные параметры чувствительности интенсивности изменения ресурса к наработке и температуре окружающего воздуха.

В реальных условиях эксплуатации температура окружающего воздуха, наработка и другие эксплуатационные факторы изменяются независимо друг от друга, то возникает необходимость разработки многофакторной математической модели, учитывающей совокупное влияние этих факторов, то есть получения аналитической зависимости выражения (8.1).

Для получения многофакторной модели необходимо найти такие сочетания значений t и L из выражений (8.4) и (8.5), при которых величины интенсивности изменения ресурса генератора будут совпадать, то есть:

$$\gamma_1 + \gamma_2 \cdot L = \beta_1 + \beta_2 t - \beta_3 \cdot t^2, \quad (8.6)$$

Для определения коэффициентов, входящих в выражение (8.6) найдем третью производную от левой части равенства по t . Тогда имеем:

$$\gamma'_{1t} + \gamma'_{2t} \cdot L = \beta_2 - 2 \cdot \beta_3 \cdot t \quad (8.7)$$

$$\gamma''_{1tt} + \gamma''_{2tt} \cdot L = -2 \cdot \beta_3 \quad (8.8)$$

$$\gamma'''_{1ttt} + \gamma'''_{2ttt} \cdot L = 0 \quad (8.9)$$

Из последнего выражения следует, что:

$$\gamma_{1ttt}''' = 0$$

$$\gamma_{2ttt}''' = 0$$

Интегрируя эти дифференциальные уравнения, получаем:

$$\gamma_1'' = \lambda_0; \quad \gamma_1' = \lambda_0 \cdot t + \lambda_1; \quad \gamma_1 = \frac{\lambda_0}{2} \cdot t^2 + \lambda_1 \cdot t + \lambda_2$$

$$\gamma_2'' = \delta_0; \quad \gamma_2' = \delta_0 \cdot t + \delta_1; \quad \gamma_2 = \frac{\delta_0}{2} \cdot t^2 + \delta_1 \cdot t + \delta_2$$

Подставим в выражение (8.6) вместо γ_1 и γ_2 их значения. Тогда получим:

$$\frac{\lambda_0}{2} \cdot t^2 + \lambda_1 \cdot t + \lambda_2 + \frac{\delta_0}{2} \cdot t^2 \cdot L + \delta_1 \cdot t \cdot L + \delta_2 \cdot L = \beta_1 + \beta_2 t - \beta_3 \cdot t^2 \quad (8.10)$$

Из равенства двух многочленов имеем, что и коэффициенты при одинаковых степенях t будут равны, то есть:

$$\beta_1 = \lambda_2 + \delta_2 \cdot L; \quad \beta_2 = \lambda_1 + \delta_1 \cdot L; \quad \beta_3 = \frac{\lambda_0}{2} + \frac{\delta_0}{2} \cdot L = \lambda_3 + \delta_3 \cdot L \quad (8.11)$$

Подставляя значения коэффициентов $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ в выражение (8.10) и исключив члены, представляющие смешанные эффекты, поскольку между смешанными эффектами и самими факторами возникает эффект мультиколлинеарности [18], а это приводит к неэффективному оцениванию параметров модели, получаем выражение степени сохранения ресурса генератора от температуры окружающего воздуха, длительности эксплуатации, эксплуатационных и технологических факторов в следующем виде:

$$U_s = \lambda_2 + \delta_2 \cdot L + \lambda_1 \cdot t - \lambda_3 \cdot t^2 \quad (8.11)$$

где $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \delta$ – коэффициенты, не зависящие от t и L , определяющие условия эксплуатации и технологические особенности автомобильного генератора.

Исходя из выражения (8.11) определим точку экстремума функции $U_s = f(t)$, для чего находим производную и приравниваем ее к нулю. Тогда получаем следующее уравнение:

$$-2 \cdot \lambda_3 \cdot t - \lambda_1 = 0 \quad (8.12)$$

Решая уравнение (8.12), получаем критическую точку

$$M_0 \left(\frac{-\lambda_1}{2 \cdot \lambda_3} \right), \text{ где } t_{\text{ОПТ}} = \frac{-\lambda_1}{2 \cdot \lambda_3}$$

Для установления, является ли точка M_0 точкой экстремума, определяем знак второй производной в этой точке M_0 , то есть:

$$U_s'' = -2 \cdot \lambda_3, \quad (8.13)$$

В зависимости от знака величины λ_3 имеем, если $\lambda_3 < 0$, то M_0 – точка минимума, $\lambda_3 > 0$, следовательно, M_0 – точка максимума.

§2 Математическая модель остаточного ресурса

Для определения коэффициентов, входящих в выражение (8.11) используем метод наименьших квадратов. Заменим коэффициенты выражения (8.11) $\lambda_2, -\lambda_1, -\lambda_3, -\delta_2$ через коэффициенты a, b, c, d соответственно. Тогда получаем:

$$U_s = a + b \cdot x + c \cdot x^2 + d \cdot z \quad (8.14)$$

Используя метод наименьших квадратов выражение (8.14) можно представить следующим образом:

$$\Pi = \sum_{i=1}^n [U_{Si} - (a + b \cdot x_i + c \cdot x_i^2 + d \cdot z_i)]_{min} \quad (8.15)$$

Составим систему нормальных уравнений, тогда имеем:

$$\begin{cases} \frac{\partial \Pi}{\partial a} = \sum_{i=1}^n [U_{Si} - (a + b \cdot x_i + c \cdot x_i^2 + d \cdot z_i)] = 0 \\ \frac{\partial \Pi}{\partial b} = \sum_{i=1}^n [U_{Si} - (a + b \cdot x_i + c \cdot x_i^2 + d \cdot z_i)] \cdot x_i = 0 \\ \frac{\partial \Pi}{\partial c} = \sum_{i=1}^n [U_{Si} - (a + b \cdot x_i + c \cdot x_i^2 + d \cdot z_i)] \cdot x_i^2 = 0 \\ \frac{\partial \Pi}{\partial d} = \sum_{i=1}^n [U_{Si} - (a + b \cdot x_i + c \cdot x_i^2 + d \cdot z_i)] \cdot z_i = 0 \end{cases} \quad (8.16)$$

Преобразуем полученную систему нормальных уравнений:

$$\begin{cases} a \cdot n + b \cdot \sum_{i=1}^n x_i + c \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 + d \cdot \sum_{i=1}^n z_i = \sum_{i=1}^n U_i \\ a \cdot x_i + b \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 + c \cdot \sum_{i=1}^n x_i^3 + d \cdot \sum_{i=1}^n z_i \cdot x_i = \sum_{i=1}^n U_i \cdot x_i \\ a \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 + b \cdot \sum_{i=1}^n x_i^3 + c \cdot \sum_{i=1}^n x_i^4 + d \cdot \sum_{i=1}^n z_i \cdot x_i^2 = \sum_{i=1}^n U_i \cdot x_i^2 \\ a \cdot \sum_{i=1}^n z_i + b \cdot \sum_{i=1}^n x_i \cdot z_i + c \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 \cdot z_i + d \cdot \sum_{i=1}^n z_i^2 = \sum_{i=1}^n U_i \cdot z_i \end{cases} \quad (8.17)$$

Произведем замены:

$$\alpha_{11} = n, \quad \alpha_{12} = \alpha_{21} = \sum x, \quad \alpha_{13} = \alpha_{31} = \alpha_{22} = \sum x^2, \quad \alpha_{14} = \alpha_{41} = \sum z$$

$$\alpha_{23} = \alpha_{32} = \sum x^3, \quad \alpha_{24} = \alpha_{42} = \sum z \cdot x, \quad \alpha_{33} = \sum x^4, \quad \alpha_{34} = \alpha_{43} = \sum z \cdot x^2$$

$$\alpha_{44} = \sum z^2, \quad b_1 = \sum y, \quad b_2 = \sum y \cdot x, \quad b_3 = \sum y \cdot x^2, \quad b_4 = \sum y \cdot z$$

Обозначив $a = x_1$, $b = x_2$, $c = x_3$, $d = x_4$, получаем систему уравнений:

$$\begin{cases} a_{11} \cdot x_1 + a_{12} \cdot x_2 + a_{13} \cdot x_3 + a_{14} \cdot x_4 = b_1 \\ a_{21} \cdot x_1 + a_{22} \cdot x_2 + a_{23} \cdot x_3 + a_{24} \cdot x_4 = b_2 \\ a_{31} \cdot x_1 + a_{32} \cdot x_2 + a_{33} \cdot x_3 + a_{34} \cdot x_4 = b_3 \\ a_{41} \cdot x_1 + a_{42} \cdot x_2 + a_{43} \cdot x_3 + a_{44} \cdot x_4 = b_4 \end{cases}$$

Решая систему с помощью определителей, получаем значения коэффициентов a, b, c, d .

Для практического использования вместо оценки U_s по выражению (8.11) необходимо использовать ее значение на интервале $\overline{U_s}$, для этого воспользуемся соотношениями теории вероятностей:

$$\overline{x+y} = \bar{x} + \bar{y}, \quad \overline{cx} = c \cdot \bar{x}, \quad \bar{c} = c, \quad \overline{x^2} = \bar{x}^2 + \sigma_x^2$$

В соответствии с этими соотношениями выражение (8.11) имеет следующий вид:

$$\overline{U_s} = \delta_2 \cdot L + \lambda_2 + \lambda_1 \cdot \bar{t} - \lambda_3 \cdot \bar{t}^2 - \lambda_3 \cdot \sigma_t^2$$

С целью дальнейшего преобразования запишем выражение следующим образом:

$$\overline{U_s} = (-\lambda_3 \cdot \bar{t}^2 + \lambda_1 \cdot \bar{t} + \lambda_2) - \lambda_3 \cdot \sigma_t^2 + \delta_2 \cdot L$$

Выражение в скобках есть квадратный трехчлен, поэтому выделив в выражении, стоящем в скобках полный квадрат, обозначив коэффициенты через α_i и учитывая полученное значение $t_{\text{опт}}$ окончательно получаем:

$$\overline{U_s} = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot [(\bar{t} - t_0)^2 + \sigma_t^2] + \alpha_3 \cdot L \quad (8.18)$$

где $\bar{t}$, σ_t^2 – соответственно среднее значение температуры окружающего воздуха и ее дисперсия за рассматриваемый период;

t_0 – оптимальная температура окружающего воздуха, соответствующая минимальной интенсивности изменения ресурса автомобильного генератора;

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – константы математической модели.

Выражение (8.18) представляет собой аддитивную модель, устанавливающую зависимость интенсивности изменения ресурса автомобильного генератора от температуры окружающего воздуха, длительности эксплуатации, эксплуатационных и технологических факторов.

Поскольку в реальных условиях эксплуатации происходит изменение факторов условий эксплуатации, следовательно, и величина интенсивности изменения ресурса автомобильного генератора на интервале межконтрольного пробега также изменяется.

В связи с этим остаточный ресурс автомобильного генератора необходимо корректировать коэффициентом адаптации K , показывающим, во сколько раз среднее значение интенсивности изменения ресурса генератора ($\bar{U}_s$) при данных значениях факторов условий эксплуатации на прогнозируемом пробеге отличается от его оптимального значения U_0 , то есть:

$$K = \frac{\bar{U}_s}{U_0} \quad (8.19)$$

Из выражения (8.18) следует, что чем больше $\Delta t = \bar{t} - t_{\text{опт}}$, то есть чем больше $\bar{t}$ отклоняется от $t_{\text{опт}}$, тем меньше величина интенсивности изменения ресурса генератора. Аналогично влияет и колебание температуры окружающего воздуха, характеризуемое величиной σ_t . С увеличением наработки интенсивность изменения ресурса генератора уменьшается линейно. Следовательно, величина интенсивности изменения

ресурса будет минимальна при следующих значениях факторов условий эксплуатации:

$$\bar{t} = t_0, \sigma_t = 0, L = 0, \text{ следовательно, } U_0 = \alpha_1$$

Тогда математическая модель остаточного ресурса автомобильных генераторов в окончательном виде имеет вид:

$$R_s = \left[\frac{\alpha_1 + \alpha_2 [(\bar{t} - t_0)^2 + \sigma_t^2] + \alpha_3 \cdot L}{\alpha_1} \right] \quad (8.20)$$

Для определения остаточного ресурса в тысячах километрах пробега используем выражение:

$$L_{\text{ост}} = L_0 \cdot \left(\frac{S_{\text{пр}} - S_{\text{т}}}{S_{\text{пр}}} \right) \quad (8.21)$$

где L_0 – наработка на отказ, тыс. км.

Таким образом, построенная математическая модель остаточного ресурса автомобильного генератора учитывает его индивидуальное техническое состояние на момент диагностирования и степень его изменения от факторов условий эксплуатации на прогнозируемом периоде.

§3 Разработка алгоритма прогнозирования остаточного ресурса

Исходя из выражения (8.20) следует, что наиболее простое решение при определении остаточного ресурса автомобильного генератора возможно в случае, когда интервал прогнозирования соответствует среднемесячному пробегу автомобиля, то есть $\Delta L = l_m$, характеризующему

интенсивность его эксплуатации, а величины $\bar{t}_m$ и $\sigma_{t_m}^2$ – соответственно среднемесячная температура окружающего воздуха и ее дисперсия.

Однако для прогнозирования ресурса автомобильных генераторов на основе многофакторной модели с переменным шагом $\Delta L = var$ возникает задача построения универсального алгоритма прогнозирования остаточного ресурса.

Такая постановка задачи определяет использование для ее решения аппарата численных методов. Используя элементы численного приближения для функции непрерывной на отрезке $[0; 1]$, можно найти сколь угодно хорошие приближения многочленами [18]. Тогда, для случая равноотстоящих точек разделим отрезок $[0; 1]$ на n частичных равных интервалов точками α_i . Многочлен $P_n(x)$ соответствующей точками

$$\alpha_i = \alpha_0 + i \cdot h, \quad i = 0, \dots, n \quad (8.22)$$

где h – длина интервала,

и принимающий значения $P_{n-1}(\alpha_i) = f_i, i = 0, \dots, n - 1$

запишем с помощью формулы Ньютона-Грегори [18]:

$$f_n = f_0 + \frac{n}{1!} \cdot \Delta f_0 + \frac{n \cdot (n-1)}{2!} \cdot \Delta^2 f_0 + \frac{n \cdot (n-1) \cdot (n-2)}{3!} \cdot \Delta^3 f_0 + \dots + \Delta^n f_0 \quad (8.23)$$

где $\Delta f_i = f_{i+1} - f_i, \quad i = 0, \dots, n - 1$

$$\Delta^2 f_i = \Delta f_{i+1} - \Delta f_i, \quad i = 0, \dots, n - 2$$

.....

$$\Delta^p f_i = \Delta^{p-1} f_{i+1} - \Delta^{p-1} f_i, \quad i = 0, \dots, n - p$$

Таким образом, построен универсальный алгоритм прогнозирования остаточного ресурса автомобильных генераторов по многофакторной модели, при «плавающих» значениях факторов условий эксплуатации.

§4 Выводы по главе

Получена математическая модель, устанавливающая зависимость интенсивности изменения ресурса автомобильного генератора от температуры окружающего воздуха и наработки. Построена математическая модель остаточного ресурса автомобильного генератора, учитывающая его техническое состояние на момент диагностирования и степень его изменения под влиянием факторов условий эксплуатации на межконтрольном пробеге.

Построен универсальный алгоритм прогнозирования остаточного ресурса автомобильных генераторов при «плавающих» значениях факторов условий эксплуатации.

Часть 4 Методика и результаты экспериментальных исследований

Глава 9 Проведение экспериментальных исследований

§1 Общая методика экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования проводятся для проверки адекватности выдвинутых гипотез, а также определения численных значений параметров математических моделей.

В процессе экспериментальных исследований решались следующие задачи:

- определение характера изменения диагностических параметров автомобильных генераторов в процессе изменения структурных параметров;
- получение данных о динамике технического состояния автомобильных генераторов с целью определения значений параметров математической модели оценки остаточного ресурса;
- проверка выдвинутых гипотез о видах математических моделей влияния факторов на интенсивность изменения ресурса автомобильных генераторов.

Структурная схема общей методики исследования приведена на рисунке 9.1. Общая методика указывает принципиальную последовательность и общие пути достижения поставленной цели. Решение частных задач производится на основе соответствующих частных методик настоящей работы. Общая методика проведения исследования позволяет определить очередность выполнения поставленных задач, что значительно сокращает время и повышает эффективность исследования.

Логическим завершением общей методики исследования является определение экономической эффективности, составление рекомендаций и внедрение результатов исследования в практику.

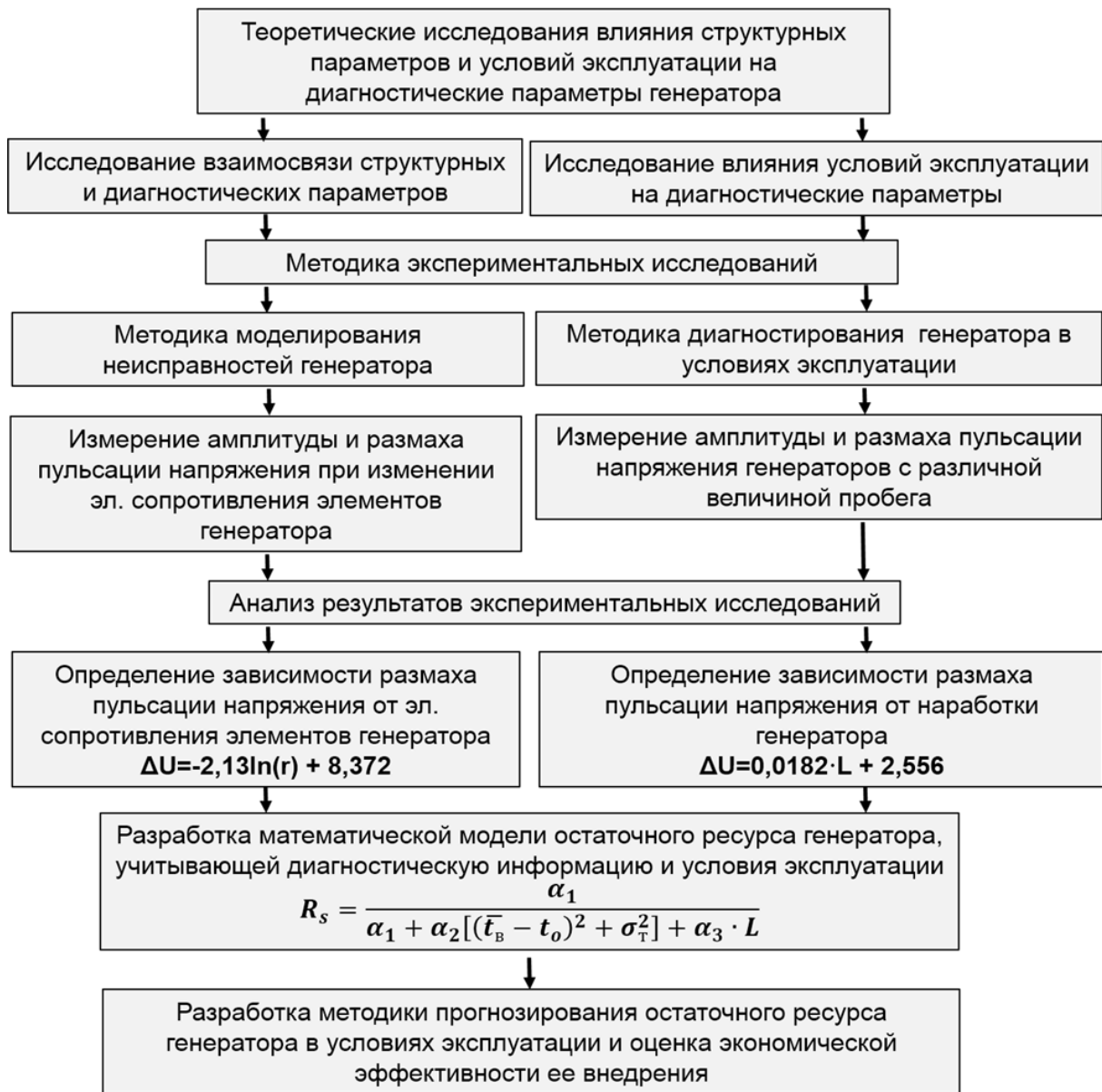


Рисунок 9.1 – Структурная схема проведения исследований

Для обеспечения полноты и достоверности статистической информации при проведении экспериментальных исследований необходимо определить минимально необходимое количество объектов и объёма наблюдений. В литературе встречаются различные рекомендации по этим вопросам. Так в работе [38] показано, что когда исследователь имеет дело со средними значениями, то уже при объёме наблюдений $n \geq 30$

“получаются обычно хорошие результаты”. Однако, объём наблюдений ещё не гарантирует точности оценок параметров регрессионной модели. Так, для двухфакторной модели стандартная ошибка коэффициента регрессии S_{ai} будет равна:

$$S_{ai} = \frac{\sigma_{\text{ост}}^2}{\sigma_{xi} \cdot \sqrt{1-r_{ij}} \cdot \sqrt{n}} , \quad (9.1)$$

где $\sigma_{\text{ост}}^2$ – остаточная дисперсия;

σ_{xi} – среднеквадратическое отклонение фактора X_i ;

r_{ij} – коэффициент корреляции между факторами i и j .

Из выражения (9.1) следует, что при фиксированном объёме наблюдений n , стандартная ошибка коэффициента регрессии находится в прямой зависимости от $\sigma_{\text{ост}}^2$ и в обратной – от σ_{xi} . То есть, чем больше доля вариации зависимой переменной, которая определяется за счёт включённых в модель факторов и чем больше вариация этих факторов, тем меньше величина S_{ai} , а, следовательно, точнее модель. Отсюда следует, что на этапе сбора данных можно минимизировать стандартные ошибки коэффициентов регрессии за счёт увеличения σ_{xi} .

То есть, необходимо использовать (отбирать) прежде всего, наблюдения над зависимой переменной только при таких значениях факторов, которые дают максимальные значения σ_{xi} . Практически это означает, что отобранные значения зависимой переменной должны быть зафиксированы при граничных значениях факторов.

Следовательно, при отборе, направленном на независимые переменные, можно минимизировать объём наблюдений и одновременно повысить точность оценки коэффициентов, входящих в регрессионную модель. Кроме того, это позволит использовать модель при осуществлении прогноза технического состояния автомобильных генераторов в реальном

диапазоне изменения выделенных факторов и в связи с этим корректно оценивать её точность.

Для проведения опытов с заданной точностью и достоверностью необходимо знать минимальное, но достаточное число измерений для данных условий. Задача сводится к установлению минимального объёма выборки (числа измерений) N_{min} при заданных значениях доверительного интервала и доверительной вероятности. При выполнении измерений устанавливается требуемая точность измерений Δ , которая не должна превышать точности прибора.

Минимальное число измерений вычисляется по формуле [28]:

$$N_{min} = \sigma^2 \cdot t^2 / \Delta^2, \quad (9.2)$$

где σ^2 – дисперсия измеренных параметров;

t – коэффициент, определяемый по таблицам распределения Лапласа или Стьюдента при доверительной вероятности 0,95 (распределение Стьюдента применяется при малом количестве измерений $n < 20$);

Δ – требуемая точность измерений.

Заданная точность Δ определяется по выражению [28]:

$$\Delta = \beta \cdot \bar{S}, \quad (9.3)$$

где: $\beta = 0,05$ – коэффициент, учитывающий долю погрешности относительно среднего значения измеряемого параметра $\bar{S}$;

$\bar{S}$ – среднее значение измеряемого параметра.

Среднее значение измеряемого параметра в свою очередь определяется:

$$\bar{S} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{n}, \quad (9.4)$$

где: $\sum_{i=1}^n S_i$ – сумма значений измеряемого параметра при n измерениях;
 n – количество измерений.

Дисперсия измеренных параметров σ^2 определяется по формуле:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{S} - S_i)^2}{n-1}. \quad (9.5)$$

При построении регрессионных моделей большое значение имеет обеспечение точности наблюдений. При этом необходимо учитывать влияние ошибок наблюдения и прежде всего, к какой переменной (зависимой или независимой) они относятся.

Случайные ошибки независимых переменных оказывают существенное влияние на величину корреляции, остаточной дисперсии, коэффициентов модели, как при наличии, так и при отсутствии корреляции между этими переменными. При этом вклад погрешности регистрации каждой переменной в приращение остаточной дисперсии определяется не только величиной ошибки, но и диапазоном изменения этой переменной и степенью её влияния на зависимую переменную. Следовательно, чем больше диапазон измерения независимой переменной, тем меньше влияние ошибок её измерения на величину коэффициентов модели. То есть, это также подтверждает необходимость организации «отбора, направленного на независимые переменные».

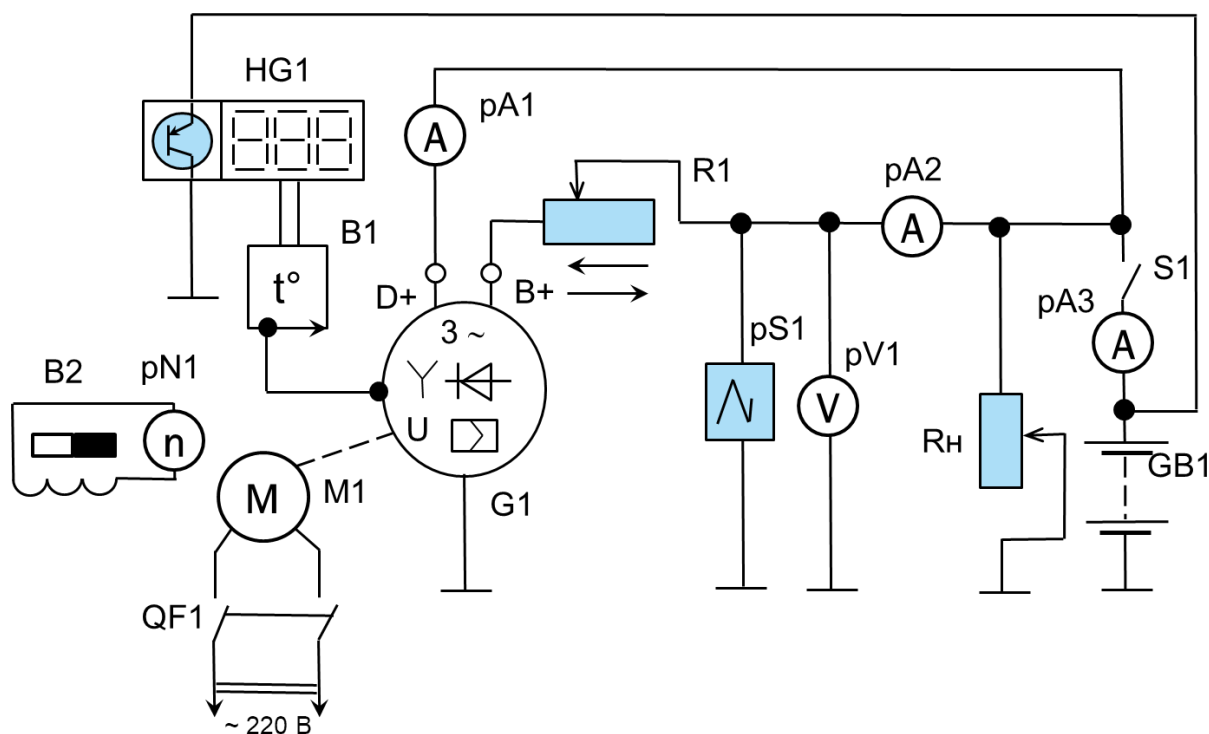
§2 Разработка аппаратного обеспечения экспериментальных исследований

Для подтверждения выявленных и теоретически обоснованных закономерностей, отражающих взаимосвязь между структурными и диагностическими параметрами генераторов транспортных средств разработан специализированный стенд, требования к которому следующие:

- включать приборы для измерения токов статора и ротора, выходного напряжения и частоты вращения ротора генератора;
- обеспечивать подключение измерителя структурных (электрических сопротивлений) и диагностических параметров автомобильного генератора;
- обеспечивать плавное изменение и поддержание в заданных пределах нагрузки генератора и частоты вращения ротора;
- содержать аккумуляторную батарею для обеспечения первоначального возбуждения генератора и возможность её отключения для исключения сглаживающего воздействия на параметры выходного напряжения;
- обеспечивать возможность физического моделирования характерных неисправностей автомобильных генераторов.

Исходя из анализа требований, предъявляемых к специализированному стенду, следует, что он должен иметь структуру, представленную на рисунке 9.2.

Для её реализации автором был разработан и изготовлен специализированный стенд, представляющий собой сварную раму, на которой закреплён репульсионный электродвигатель мод. 529У4, предназначенный для привода во вращение проверяемых генераторов, обороты которых регулируются путём смещения щёток двигателя с электрической нейтрали, посредством тросикового привода.



B1 – датчик температуры генератора; B2 – датчик частоты вращения; G1 – испытываемый генератор (94.3701); GB1 – аккумуляторная батарея (6СТ-55L); HG1 – индикатор температуры генератора; M1 – электродвигатель (529У4); QF1 – автоматический выключатель стенда; pA1 – амперметр силы тока обмотки возбуждения; pA2 – амперметр силы тока генератора; pA3 – амперметр силы тока аккумуляторной батареи; pV1 – вольтметр; pN1 – тахометр; pS1 – осциллограф; R1 – реостат физического моделирования неисправностей; Rn – нагрузочный реостат; S1 – выключатель АКБ

Рисунок 9.2 – Принципиальная схема специализированного стенда

Вращение на ротор генератора передаётся посредством поликлинового ремня ремённой передачи с передаточным отношением 1:2,41. Измерение частоты вращения обеспечивается индуктивным датчиком 2112-3847010-04, сопряжённым с зубчатым венцом, расположенным на шкиве приводного электродвигателя.

На лицевой панели стенда находятся: измерительные приборы, такие как вольтметр и амперметры (для измерения силы тока аккумуляторной батареи, силы тока генератора, силы тока обмотки ротора); автомат для

подачи питания (220 В) на электродвигатель стенда; контрольная лампа, сигнализирующая о начале выработки напряжения автомобильным генератором; клеммы для подключения цифрового осциллографа и тумблеры для физического моделирования неисправностей.

Для физического моделирования неисправностей последовательно или параллельно элементам генератора (обмоткам, диодам выпрямителя) подключаются сопротивления, выполненные из нихромовой спирали.

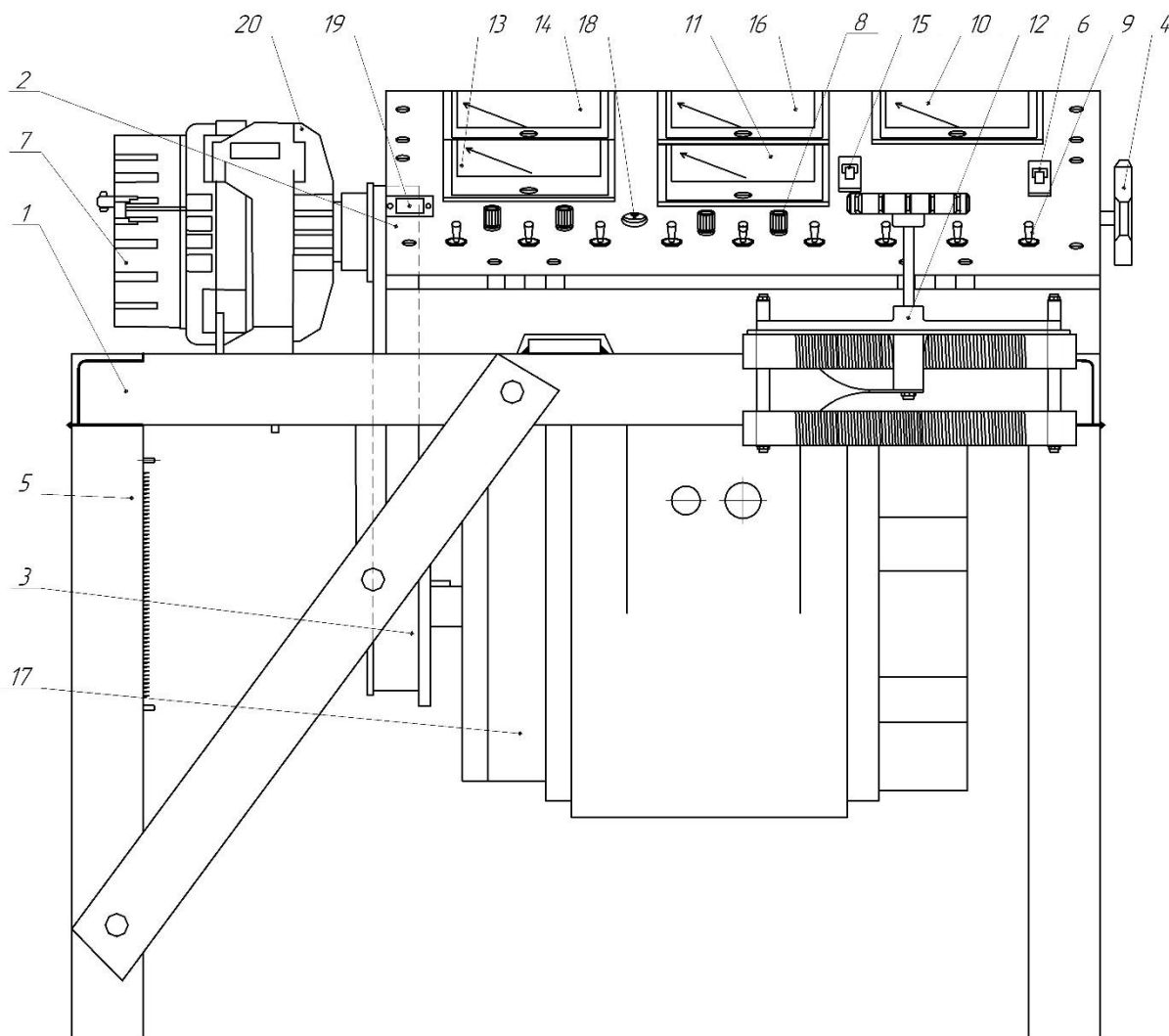


Рисунок 9.3 – Общий вид специализированного стенда

На рисунке 9.3 цифрами обозначены: 1 – рама стенда; 2 – лицевая панель стенда; 3 – ремень привода генератора; 4 – маховик тросикового привода; 5 – электрические сопротивления, обеспечивающие физическое моделирование неисправностей; 6 – автоматический выключатель

аккумуляторной батареи; 7 – испытываемый генератор; 8 – клеммы присоединения цифрового осциллографа; 9 – тумблеры ввода неисправностей; 10 – амперметр силы тока генератора; 11 – тахометр; 12 – регулятор нагрузки генератора; 13 – амперметр силы тока в обмотке возбуждения генератора; 14 – вольтметр напряжения генератора; 15 – автоматический выключатель стенда; 16 – амперметр силы тока аккумуляторной батареи; 17 – репульсионный электродвигатель; 18 – контрольная лампа; 19 – индикатор температуры генератора; 20 – датчик температуры генератора.

Таблица 9.1 – Параметры специализированного стенда

Наименование параметра	Значение
Тип приводного электродвигателя	репульсионный переменного тока
Напряжение питания	220 В, 50 Гц
Мощность электродвигателя	1100 Вт S1
Частота вращения электродвигателя	
номинальная	3000 1/мин
максимальная	5000 1/мин
Привод генератора	ремённая передача
Передаточное отношение электродвигатель-генератор	1:2,41
Модель генератора	94.3701
Номинальный ток	80 А
Номинальное напряжение	14 В
Регулируемое напряжение	13,8-14,6 В
Модель аккумуляторной батареи	6СТ-55L
Габаритные размеры стенда	750x320x790 мм
Масса стенда	83 кг

Согласно исследованиям, проведённым автором и другими учёными [10, 25, 43], искажение результатов исследований обусловлено наличием в электрической цепи аккумуляторной батареи и регулятора напряжения. Аккумуляторная батарея сглаживает колебаний выходного напряжения, значительно снижая информативность диагностического параметра – размаха колебаний напряжения. Регулятор напряжения поддерживает

среднее значение напряжения посредством увеличения тока обмотки ротора, маскируя возникновение неисправностей. В то же время регулятор напряжения не меняет характер изменения основного диагностического параметра – размаха колебаний напряжения.

Поэтому для исключения искажающего влияния регулятора напряжения на результаты эксперимента он был демонтирован (см. рисунок 9.4).

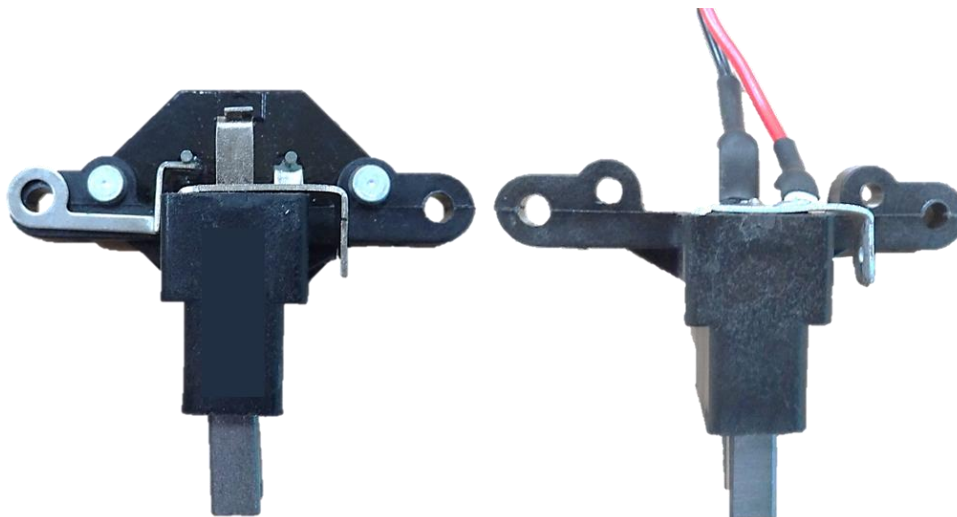


Рисунок 9.4 – Схема модернизированного щёткодержателя (слева – с регулятором напряжения, справа – без регулятора)

Определение смоделированных неисправностей предполагает получение и анализ осциллограмм выходного напряжения генератора с помощью переносного осциллографа, подключаемого к клеммам стенда, выведенным на лицевую панель. Общий вид разработанного аппаратно-программного комплекса, позволяющего производить оценку технического состояния генераторов транспортных средств приведен на рисунке 9.5.

Разработанный аппаратно-программный комплекс позволяет:

- проводить параметрические испытания генераторов транспортных средств;
- производить оценку технического состояния генераторов транспортных средств на основе осциллограмм выходного напряжения;

- точно определять конкретные неисправности генераторов транспортных средств на основе формы полученных осциллограмм;
- прогнозировать остаточный ресурс генераторов транспортных средств на основе разработанной методики.



Рисунок 9.5 – Аппаратно-программный комплекс диагностирования генераторов транспортных средств

Практическая ценность аппаратно-программного комплекса заключается в своевременном определении неисправностей, которые в ближайшем будущем приведут к выходу из строя генераторов транспортных средств.

§3 Выводы по главе

Разработана структурная схема проведения исследований, которую условно можно разделить на два независимых этапа проведения: в лабораторных условиях на стенде и в производственных условиях на транспортном средстве.

Этап лабораторных исследований потребовал разработки специализированного стенда, позволяющего не только регулировать в

широких пределах рабочие параметры генератора, но и моделировать характерные неисправности генератора с целью подтверждения взаимосвязи структурных и диагностических параметров. Объединение специализированного стенда и разработанного программного обеспечения позволило создать гибкий аппаратно-программный комплекс, позволяющий проводить исследование как параметров выходного напряжения генераторов, так и параметров теплового состояния и внешнего магнитного поля.

Глава 10 Методика определения диагностических параметров генератора в процессе физического моделирования неисправностей

Цель эксперимента – определение диапазона изменения диагностических параметров в процессе физического моделирования неисправностей автомобильного генератора.

Существует два способа экспериментального обоснования диапазонов изменения структурных параметров (электрических сопротивлений), соответствующих работоспособному состоянию и характерным неисправностям элементов автомобильных генераторов.

В первом случае необходимо провести обследование большого парка автомобилей одного модельного ряда с целью сбора статистической информации об изменении электрических сопротивлений элементов генератора в процессе эксплуатации. Существенным недостатком данного способа является длительность эксперимента, а также необходимость снятия генераторов с транспортного средства.

Второй способ заключается в физическом моделировании неисправностей автомобильных генераторов в лабораторных условиях на специализированном стенде. Преимуществами данного способа можно

считать значительное ускорение эксперимента, возможность моделирования совокупности ряда неисправностей, а также установление чёткой границы между работоспособным и неработоспособным состоянием генератора.

§1 Методика физического моделирования неисправностей автомобильного генератора

Разница между моделью и реальным процессом заключается в продолжительности развития дефекта. Ухудшение изоляции обмоток статора происходит при продолжительной эксплуатации, перегрузках и т. п. аномальных режимах. Процесс этот может растягиваться на долгое время, и чтобы отследить его, необходимо большое количество измерений с большим интервалом между замерами.

Рассмотрим возможности моделирования неисправностей автомобильного генератора применительно к отдельным его узлам.

К основным неисправностям обмотки ротора относятся межвитковые замыкания, замыкания на корпус («массу»), обрыв обмотки и нарушение контакта в месте пайки выводов обмотки ротора к контактными кольцам (по сути, начальная стадия неисправности приводящей к обрыву обмотки). Указанные неисправности сопровождаются изменением электрического сопротивления обмотки, которое уменьшается при замыканиях и увеличивается в остальных случаях.

Если рассматривать схему замещения обмотки ротора (см. рисунок 10.1), то можно сделать вывод, что для увеличения сопротивления обмотки необходимо последовательно с ней включить реостат **R1**, регулируя сопротивление которого можно моделировать нарушение контакта в месте пайки выводов обмотки ротора к контактными кольцам (при промежуточном положении) или обрыв обмотки – в крайнем положении реостата. К тому же

результату – увеличению сопротивления обмотки ротора можно свести такие неисправности, как окисление поверхности контактных колец и плохой контакт между щётками и контактными кольцами.

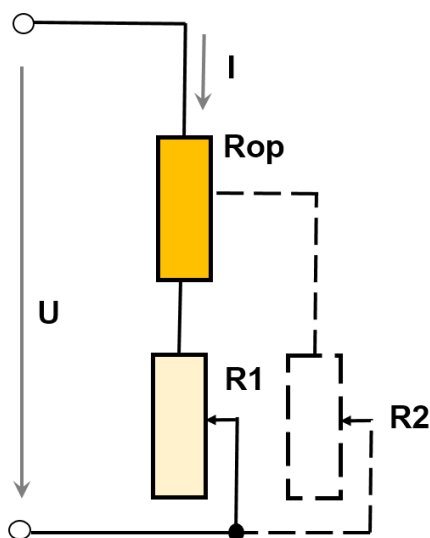


Рисунок 10.1 – Схема физического моделирования неисправностей обмотки ротора генератора

Гораздо сложнее технически уменьшить сопротивление обмотки ротора, поскольку при этом требуется путём удаления части покровной и витковой изоляции подпаять вывод к средней части обмотки (показано пунктиром на рисунке 10.1). Высокая частота вращения ротора не позволит осуществить надёжное соединение этого вывода с неподвижной частью генератора.

Так как при уменьшении сопротивления обмотки ротора не происходит изменения величины магнитного потока, а, следовательно, величины и формы выходного напряжения, то невозможность физического моделирования данных неисправностей не скажется на решении поставленной задачи.

Основным отличием обмотки статора от уже рассмотренной обмотки ротора является её многофазность, а значит и возможность межфазного замыкания.

Так как обмотка статора размещена неподвижно и лишена покровной изоляции, то становится возможным моделирование межвитковых и корпусных замыканий путём подпайки реостата **R3** к виткам обмотки (см. рисунок 12.2). Также на рисунке показано моделирование обрыва одной из фаз обмотки – реостат **R1**, и межфазного замыкания – реостат **R3**.

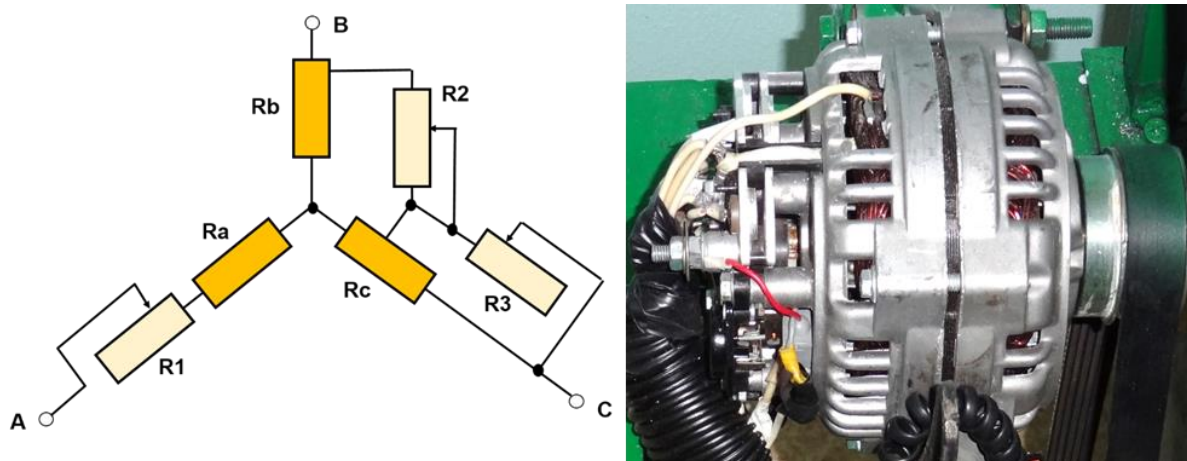


Рисунок 10.2 – Схема физического моделирования неисправностей трёхфазной обмотки статора

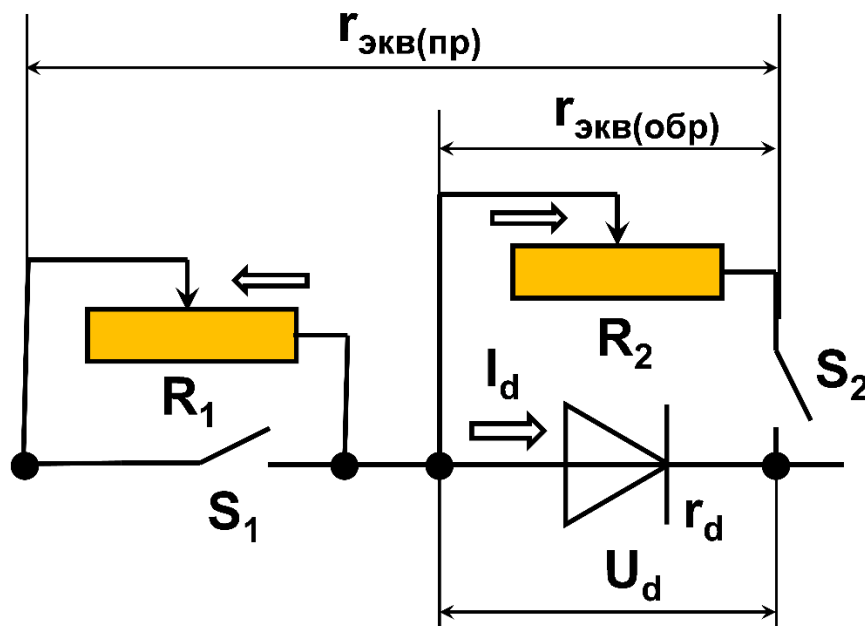
Физическое моделирование замыкания в обмотке статора создаётся при помощи специально выведенного наружу из обмотки статора вывода (рисунок 10.2). Для этого в задней крышке генератора выполнен пропил и удалена часть рёбер с целью обеспечения доступа к обмотке.

Для моделирования переходного сопротивления изоляционного слоя в точке замыкания, этот вывод замыкается через регулируемое активное сопротивление. Это позволяет регулировать значение тока в короткозамкнутом контуре и получать различные степени тяжести исследуемых повреждений, которые создаются путём изменения тока в короткозамкнутом контуре.

Одновременное замыкание выключателей S1 и S4, приводит к тому, что реостат R1 (рисунок 10.5) оказывается включенным параллельно фазе **u** обмотки статора, что позволяет моделировать замыкание фазы на корпус генератора.

Выпрямительный блок представляет собой последовательно-параллельное соединение группы полупроводниковых диодов (как правило, не меньше шести). Следовательно, неисправности диодов можно разбить на две группы: относящиеся к одному из диодов и групповые неисправности. Неисправности диодов сводятся к обрыву внутренней цепи (сопротивление стремится к бесконечности) и короткому замыканию (сопротивление стремится к нулю).

Поэтому для физического моделирования этих неисправностей последовательно (параллельно) диоду (см. рисунок 10.3) включается реостат, изменяя сопротивление которого можно помимо перечисленных граничных значений получить ряд промежуточных.



R_1 – реостат, позволяющий имитировать короткое замыкание диода, R_2 – реостат, позволяющий имитировать обрыв диода, S_1 – выключатель, задействующий обрыв диода, S_2 – выключатель, задействующий короткое замыкание диода

Рисунок 10.3 – Схема физического моделирования неисправностей полупроводникового диода

К групповым неисправностям можно отнести одновременный отказ двух диодов одной фазы («выгорание» фазы), отказ трёх диодов

положительной или отрицательной полярности, а также комбинацию коротких замыканий («пробоев») и обрывов цепи любых диодов выпрямителя. Методика моделирования групповых неисправностей рассмотрена в работе В.Д. Кулика «Аномальные режимы работы полупроводниковых выпрямителей и их диагностика» (рисунок 10.4).

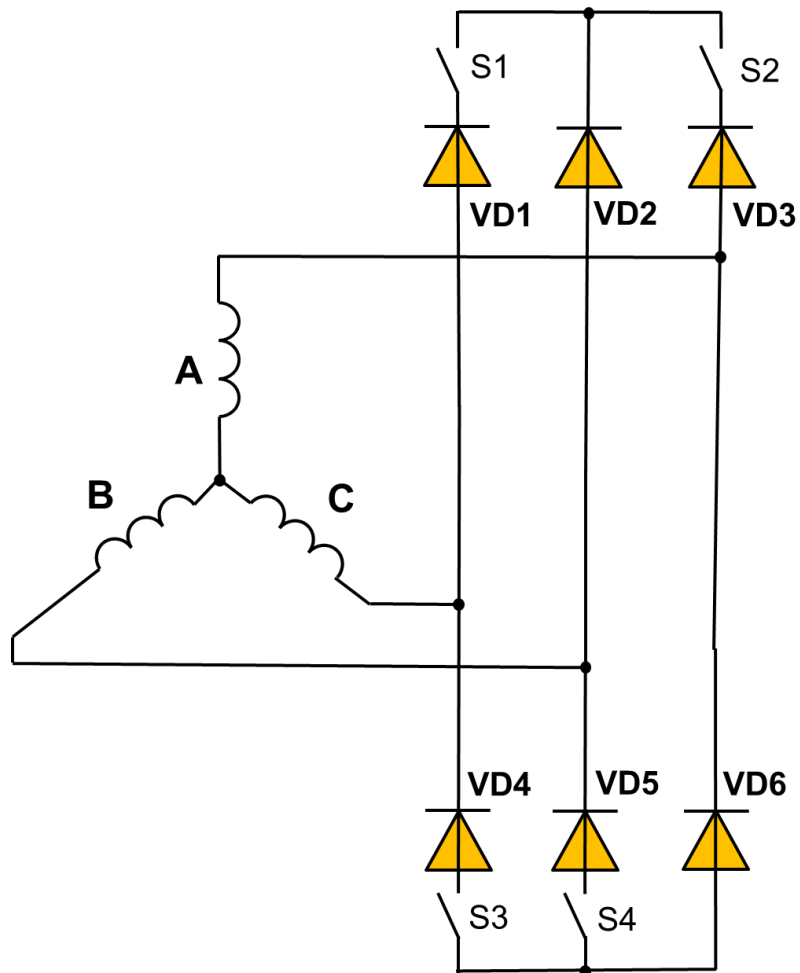
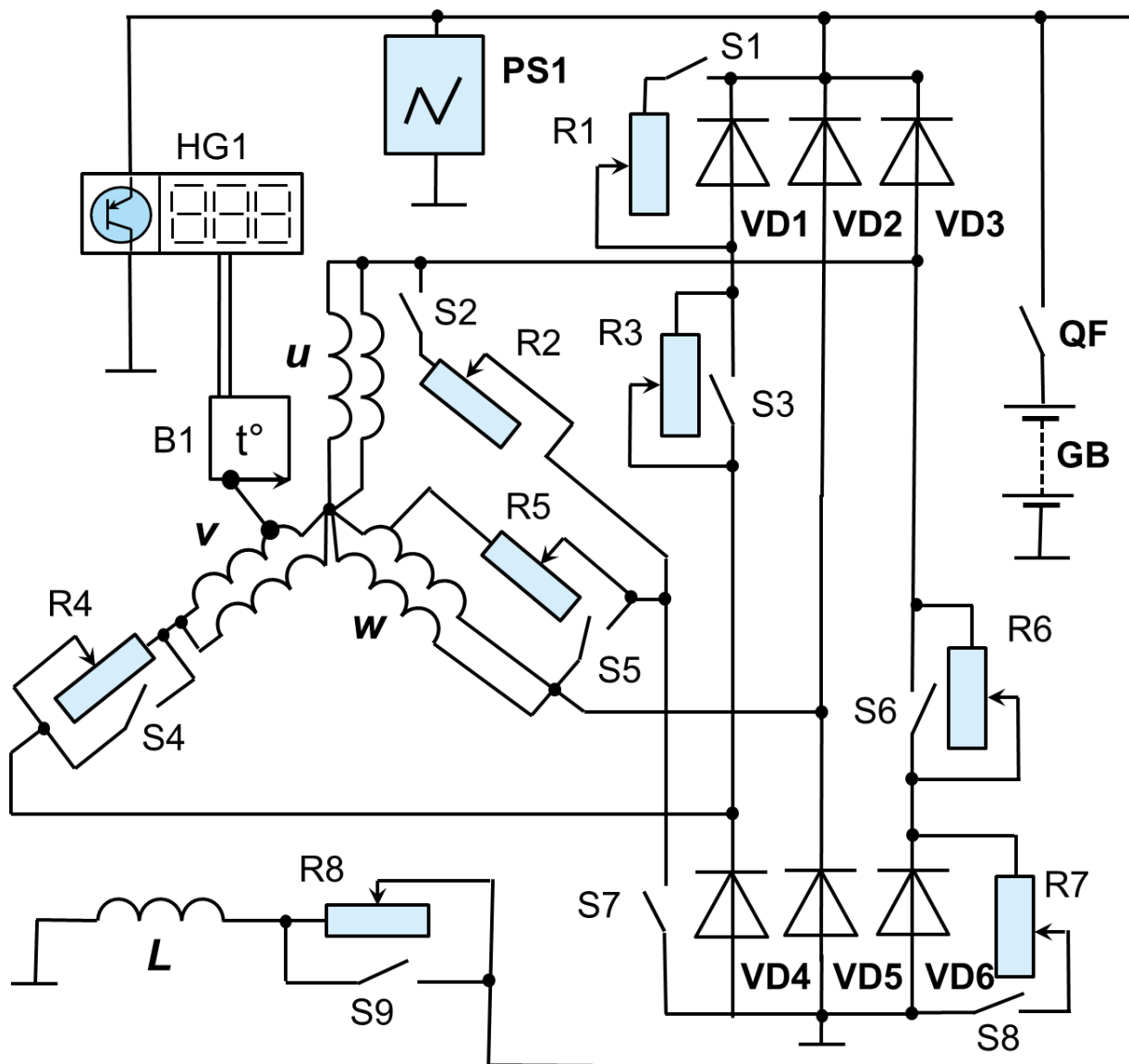


Рисунок 10.4 – Схема моделирования групповых неисправностей выпрямителя генератора

Общая электрическая схема физического моделирования электрических неисправностей путём присоединения реостатов к элементам генератора показана на рисунке 10.5.



B1 – датчик температуры; GB – источник питания (аккумуляторная батарея); HG1 – индикатор температуры; L – обмотка возбуждения генератора; рS1 – цифровой осциллограф; R1-R8 – реостаты моделирования неисправностей; S1-S9 – выключатели; QF – выключатель аккумуляторной батареи; VD1-VD6 – диоды выпрямительного блока; u, v, w – фазы обмотки статора генератора.

Рисунок 10.5 – Электрическая схема физического моделирования неисправностей генератора

§2 Методика определения диагностических параметров автомобильных генераторов при изменении структурных параметров

Основными диагностическими параметрами генераторов транспортных средств, согласно вышеизложенным положениям, являются величина и форма выходного напряжения, оцениваемые средним значением U_d и размахом колебаний ΔU соответственно.

В качестве измерительного прибора в процессе проведения эксперимента использовался цифровой осциллограф (скопметр) Hantek DSO-1062B, техническая характеристика которого приведена в таблице 10.1. Для подключения к компьютеру осциллограф-мультиметр оснащен портом USB, а программное обеспечение позволяет обрабатывать полученные результаты на компьютере.



Рисунок 10.6 – Общий вид цифрового осциллографа Hantek DSO-1062B

Таблица 10.1 – Характеристика цифрового осциллографа Hantek DSO-1062B

Каналов	2
Аналоговая полоса пропускания	60 МГц
Входной импеданс	Сопротивление: 1М
Входная чувствительность	2мВ/деление до 5В/деление
Диапазоны времени	2 нс/деление до 2000 с/деление
Память	1М замеров при одном канале, 512К замеров в двухканальном режиме
Точность временной задержки	50ppm
Погрешность измерения	3%

Проведение эксперимента осуществляется в следующей последовательности:

1) Подготовка стенда к работе.

Для приведения стенда в рабочее состояние необходимо перевести все тумблеры в нижнее положение, рукоятку нагрузки и частоты вращения повернуть в крайнее левое положение. Подключить стенд к сети питания (220 В, 50 Гц) при помощи штепсельной вилки В6-004. К стенду подключить аккумуляторную батарею соблюдая полярность (рисунок 10.7).

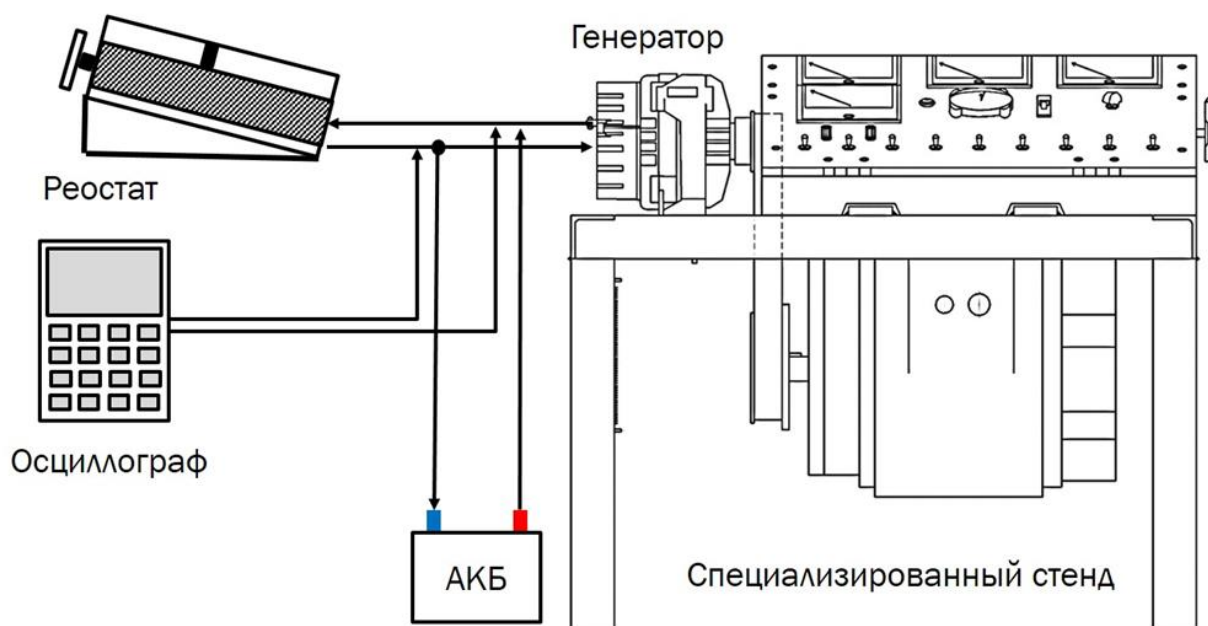


Рисунок 10.7 – Схема проведения измерения диагностических параметров на специализированном стенде

2) Подготовка к проведению измерений.

К выводам генератора присоединить лабораторный реостат РСРС2-15, с помощью которого производится физическое моделирование короткого замыкания (параллельное) или обрыва цепи (последовательное) подключение. Перед началом эксперимента сопротивление реостата устанавливается на максимум или на минимум, исходя из типа исследуемой неисправности. К выводам генератора подключить цифровой осциллограф Hantek DSO-1062B (положительный щуп соединить с выводом В+ генератора, а отрицательный – с корпусом генератора).

3) Проведение измерений.

При помощи автоматического выключателя на лицевой панели стенда подать стенд напряжение (220 В, 50 Гц), при этом приводной электродвигатель начинает работать, обеспечивая вращение вала ротора испытываемого генератора.

С помощью второго автоматического выключателя подключить аккумуляторную батарею, тем самым обеспечив возбуждение генератора и выработку им электроэнергии.

Поворачивая рукоятку увеличить частоту вращения ротора генератора, контролируя её значение по шкале тахометра. Установить фиксированную частоту вращения ротора генератора ($n = 1500$ 1/мин), поддерживая её неизменной. Отключить аккумуляторную батарею.

Рукоятку нагрузки оставить в крайнем правом положении, обеспечивая режим холостого хода.

Включить цифровой осциллограф и записать амплитудное и среднее значение, а также размах колебаний выходного напряжения. Сохранить полученную осциллограмму на подключённый к осциллографу flash-накопитель.

Процедуру повторить для каждого из фиксированных значений сопротивления лабораторного реостата ($r_H = 0,01 - 16,4$ Ом). Полученные значения приведены в таблице 10.2.

4) Окончание измерений.

Рукоятку лабораторного реостата привести в исходное положение.

Выключить цифровой осциллограф. Рукоятку частоты вращения установить в крайнее правое положение и выключить питание стенда.

Эксперимент необходимо повторить для всех характерных неисправностей автомобильных генераторов.

Таблица 10.2 – Результаты физического моделирования неисправностей

Номер опыта	Соппротивление реостата, Ом	Размах колебаний, В	Среднее значение напряжения, В	Частота вращения, мин ⁻¹
Обрыв диода				
1	0	5,2	14,0	1500
2	0,4	7,8	14,0	1500
3	1,0	8,0	13,8	1500
4	1,4	10,4	13,8	1500
5	1,8	11,6	13,0	1500
6	2,2	13,2	12,8	1500
7	3,0	13,6	12,0	1500
8	6,0	15,2	11,8	1500
9	11,0	18,4	11,8	1500
10	16,4	18,4	11,8	1500
Короткое замыкание диода				
1	0	12,4	6,6	1500
2	0,4	11,4	10,6	1500
3	1,0	9,2	12,6	1500
4	1,4	6,8	13,4	1500
5	1,8	5,6	13,8	1500
6	2,2	5,4	14,0	1500
7	3,0	5,2	14,0	1500
8	6,0	5,0	14,2	1500
9	11,0	4,8	14,2	1500
10	16,4	4,8	14,2	1500
Межфазное замыкание				
1	0	15,4	8,2	1500
2	0,4	12,4	9,6	1500
3	1,0	7,4	12,4	1500
4	1,4	6,6	13,6	1500
5	1,8	6,0	13,8	1500
6	2,2	5,8	14,0	1500
7	3,0	5,4	14,2	1500
8	6,0	5,2	14,4	1500
9	11,0	5,0	14,4	1500

Продолжение таблицы 10.2

Номер опыта	Соппротивление реостата, Ом	Размах колебаний, В	Среднее значение напряжения, В	Частота вращения, мин ⁻¹
10	16,4	4,8	14,4	1500
Обрыв фазы статора				
1	0	5,6	14,2	1500
2	0,4	6,6	13,0	1500
3	1,0	9,6	11,4	1500
4	1,4	10,8	10,2	1500
5	1,8	12,0	10,0	1500
6	2,2	12,8	9,8	1500
7	3,0	14,0	9,0	1500
8	6,0	16,6	8,8	1500
9	11,0	17,4	8,4	1500
10	16,4	17,4	8,2	1500
Межвитковое замыкание фазы статора				
1	0	10,0	10,2	1500
2	0,4	8,8	13,0	1500
3	1,0	7,4	13,4	1500
4	1,4	5,8	13,4	1500
5	1,8	5,6	13,6	1500
6	2,2	5,4	13,8	1500
7	3,0	5,2	13,8	1500
8	6,0	5,0	14,0	1500
9	11,0	5,0	14,2	1500
10	16,4	4,8	14,2	1500
Замыкание фазы на корпус				
1	0	8,8	9,6	1500
2	0,4	7,8	11,2	1500
3	1,0	5,8	13,6	1500
4	1,4	5,6	13,8	1500
5	1,8	5,6	14,0	1500
6	2,2	5,4	14,0	1500
7	3,0	5,2	14,2	1500
8	6,0	5,2	14,4	1500
9	11,0	5,0	14,4	1500
10	16,4	5,0	14,4	1500
Обрыв обмотки ротора				
1	0	5,0	14,2	1500
2	0,4	5,0	14,2	1500
3	1,0	5,0	13,8	1500
4	1,4	5,2	13,4	1500
5	1,8	5,4	13,4	1500
6	2,2	5,4	13,2	1500
7	3,0	4,8	12,2	1500
8	4,4	3,8	9,2	1500
9	4,75	3,0	6,6	1500
10	>4,75	0	0	1500

§3 Выводы по главе

Разработана методика физического моделирования неисправностей генераторов, основанная на последовательном или параллельном присоединении к элементам генератора регулируемого активного сопротивления. Рассмотрено моделирование обрыва обмотки ротора, обрыв и межвитковое замыкание фазы обмотки статора, замыкание фазы обмотки статора на корпус генератора, межфазное замыкание обмотки статора, обрыв цепи и короткое замыкание диодов выпрямителя.

Экспериментально определено изменение диагностических параметров (среднего значения U_d и размаха колебаний ΔU выходного напряжения) в процессе плавного изменения структурного параметра (электрического сопротивления элементов генератора) для вышеперечисленных электрических неисправностей.

Глава 11 Методика экспресс-диагностирования автомобильных генераторов в процессе эксплуатации

Цель эксперимента – получение данных о динамике технического состояния автомобильных генераторов для определения значений параметров математических моделей, а также получения численных значений диагностического параметра – размаха колебаний выходного напряжения генераторов при их различном техническом состоянии.

§1 Разработка экспресс-метода диагностирования генераторов

Основным фактором, затрудняющим получение точной диагностической информации непосредственно на автомобиле, является

аккумуляторная батарея (АКБ), обладающая способностью сглаживать колебаний выпрямленного напряжения (рисунок 11.1).

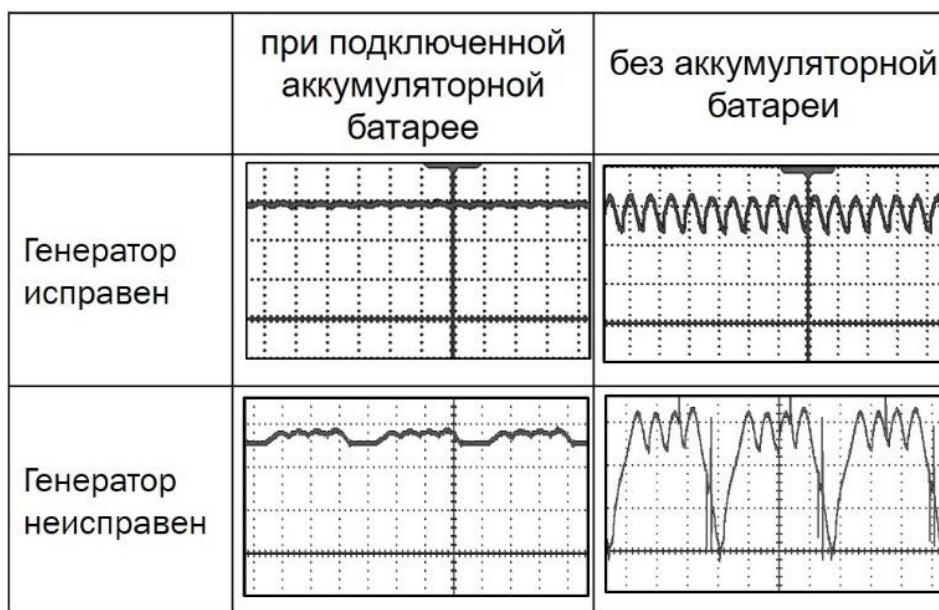
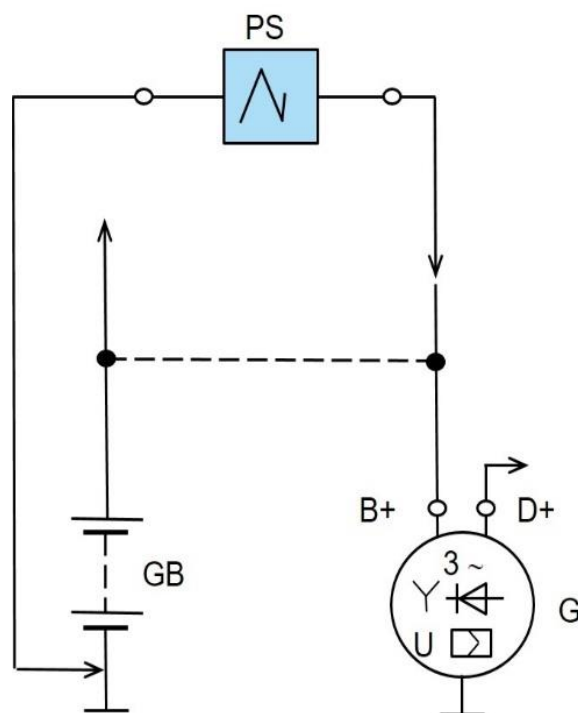


Рисунок 11.1 – Влияние АКБ на информативность осциллограмм выходного напряжения автомобильных генераторов

Гриценко А.В. в работе [10] предлагает для исключения данного фактора подключать к генератору активную нагрузку с одновременным отключением его от батареи. Недостатком данного способа является отсутствие подобной нагрузки в условиях сервисных предприятий.

Для определения диагностических параметров нами предлагается снимать осциллограммы на силовом выходе автомобильного генератора, предварительно отключив его от аккумуляторной батареи (рисунок 11.2). Тем самым исключается сглаживающее действие аккумуляторной батареи на форму осциллограмм выходного напряжения и повышается их информативность. Важно отметить, что сама аккумуляторная батарея **НЕ** отключается от автомобиля, поскольку это запрещено правилами эксплуатации транспортных средств.



B+ – силовой вывод генератора, D+ – вывод на контрольную лампу, G – автомобильный генератор, GB – аккумуляторная батарея, PS – цифровой осциллограф.

Рисунок 11.2 – Предлагаемая схема проведения диагностирования генератора на транспортном средстве

Диагностирование выполняется в следующей последовательности: отсоединяют силовой провод автомобильного генератора, подключённый к положительной клемме аккумуляторной батареи; присоединяют положительный щуп переносного осциллографа к силовому выводу генератора, отрицательный щуп осциллографа – к отрицательной клемме аккумуляторной батареи, либо к другому месту, имеющему надёжный контакт с корпусом («массой») автомобиля; осуществляют запуск двигателя автомобиля; включают переносной осциллограф и записывают осциллограмму выходного напряжения генератора в память осциллографа, либо на подключённый к нему flash-накопитель.

Разработанный метод экспресс-диагностирования [36] позволяет проводить оценку технического состояния любых синхронных вентильных

генераторов без снятия с транспортного средства по параметрам выходного напряжения, путём сопоставления полученного значения размаха колебаний с допустимым.

Таблица 11.1 – Трудоёмкость предложенного метода диагностирования

Наименование операции	Трудоёмкость, чел.-мин.	Необходимое оборудование
1	2	3
1. Подготовительная	1,00	—
1.1 Открыть капот и зафиксировать его	0,20	—
1.2 Проверить натяжение приводного ремня генератора	0,50	Прибор для проверки натяжения приводного ремня
1.3 Ослабить крепление провода от вывода В+ генератора к АКБ	0,30	Торцовый ключ 10, 13 мм
2. Диагностическая	1,10	—
2.1 Завести двигатель	0,10	—
2.2 Отсоединить провод генератора от АКБ	0,10	—
2.3 Включить переносной осциллограф и присоединить его к выводу В+ генератора и «массе» автомобиля	0,20	Цифровой осциллограф
2.4 Сохранить полученную осциллограмму	0,20	Цифровой осциллограф, flash-накопитель
2.4 Заполнить диагностическую карту	0,50	Шариковая ручка
3. Заключительная (см. п. 1)	0,60	—
ИТОГО	2,70	—

Рассматриваемый метод можно отнести к экспресс-методам на основании минимальной трудоёмкости (менее 3 чел.-мин.) и ограниченного числа диагностируемых параметров (среднее значение и размах колебаний выходного напряжения).

Экспериментальные исследования с целью получения данных об изменении диагностических параметров автомобильных генераторов с учётом температурного режима окружающего воздуха и наработки проводились в условиях автосервисных предприятий АО «Лада-Сервис», ФКУ «ЦХ и СО» УМВД России по Оренбургской области и других.

В качестве объекта диагностирования использовались автомобили семейства ВАЗ (ВАЗ 2170 «Приора», ВАЗ 2190 «Гранта», ВАЗ 2110, ВАЗ 2123, ВАЗ 21099, ВАЗ 1118 «Калина» и т.п.). Исследуемые автомобили штатно укомплектованы генераторами отечественного производства с номинальной силой тока 90А, 105А и 110А, имеющими аналогичное конструктивное исполнение.

Величина наработки определялась по показаниям штатного одометра автомобиля и варьировалась в интервале от 1,0 до 270,0 тысяч километров пробега. Информация о температурном режиме окружающего воздуха на момент диагностирования выбиралась из сводок на метеостанции г. Оренбурга. Результаты заносились в диагностическую карту (рисунок 11.3).

ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ КАРТА ПРОВЕРКИ ГЕНЕРАТОРА_____

Марка, модель ТС_____

Год выпуска_____

Пробег ТС, км_____

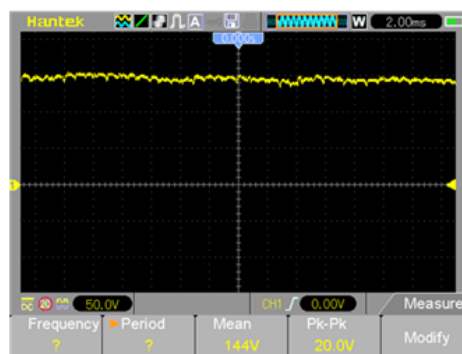
Модель генератора_____

Заряд аккумулятора, В_____

Натяжение ремня_____

Время проверки_____

Примечания_____



Параметры, по которым установлено несоответствие

Наименование параметра	Нижняя граница	Результат проверки	Верхняя граница
Амплитуда напряжения, В	13,8	14,4	14,6
Размах напряжения, В	0	2,0	7,4
Заключение о наличии неисправностей и требуемых воздействиях:			

Дата «___»_____2015 ФИО диагноста Подпись Печать

Получил _____Иванов Иван Иванович

Рисунок 11.3 – Диагностическая карта проверки генератора

Результаты диагностирования генераторов автомобилей ВАЗ в условиях сервисных предприятий указанным методом приведены в таблице 11.2.

Таблица 11.2 – Результаты экспериментальных исследований диагностических параметров в условиях эксплуатации (исправные генераторы)

Марка, модель автомобиля	Пробег автомобиля, км	Среднее значение напряжения, В	Размах колебаний напряжения, В	Температура окружающего воздуха, °С
1	2	3	4	5
1. ВАЗ 2172	1000	14,0	2,4	+5
2. Lada Гранта	1711	14,4	2,0	+14
3. Нива	4000	14,2	2,8	+11
4. ВАЗ 21123	5000	14,0	1,9	+13
5. Lada Калина	6723	14,0	2,2	+23
6. ВАЗ 2170	7771	14,6	1,9	+6
7. Lada Ларгус	12800	14,2	3,0	+25
8. ВАЗ 2114	13904	14,0	2,2	+20
9. ВАЗ 2112	20000	14,4	3,0	+6
10. ВАЗ 2121	23783	14,2	3,8	+9
11. ВАЗ 2190	27000	14,0	2,5	+21
12. ВАЗ 2192	28500	14,0	2,6	+6
13. ВАЗ 2192	30200	14,0	2,4	+11
14. ВАЗ 2115	35000	14,0	3,0	+14
15. ВАЗ 2111	38700	14,4	3,4	+8
16. ВАЗ 21704	39200	14,0	4,0	+2
17. ВАЗ 2110	40000	14,6	4,2	+19
18. ВАЗ 2172	40500	14,6	3,2	+24
19. ВАЗ 21099	43000	14,2	4,0	+1
20. Lada Гранта	47800	14,6	3,2	+22
21. Lada Ларгус	50000	14,0	4,4	+26
22. Lada Калина	52900	14,6	3,6	+26
23. Lada Калина	54600	14,6	3,8	+2
24. ВАЗ 2123	55000	14,2	4,2	+4
25. ВАЗ 2172	56600	14,4	4,2	+6
26. ВАЗ 2109	80000	14,4	3,4	+11
27. ВАЗ 2170	82800	14,8	3,7	+11
28. ВАЗ 2172	84000	14,2	3,3	+7
29. Lada Калина	84400	14,4	4,4	+17
30. Lada Ларгус	90000	14,0	4,2	+22

Продолжение таблицы 11.2

1	2	3	4	5
31. Lada Калина	90285	14,2	3,6	+3
32. Нива	92605	14,2	3,8	0
33. ВАЗ 2172	100000	14,2	5,2	+4
34. ВАЗ 21099	100000	14,2	4,2	+2
35. ВАЗ 2112	117156	14,2	4,5	+10
36. ВАЗ 2114	119023	14,0	4,6	+14
37. Lada Калина	120000	14,2	5,0	+20
38. ВАЗ 2110	127000	14,4	5,0	+15
39. ВАЗ 2172	128000	14,4	5,0	+1
40. ВАЗ 2110	131000	13,8	5,1	+12
41. ВАЗ 2110	135000	14,2	6,0	+13
42. ВАЗ 2115	145500	14,4	6,0	+20
43. ВАЗ 2110	148900	14,3	5,3	+14
44. ВИС	150000	14,4	4,6	+16
45. ВАЗ 2114	150000	14,4	6,2	+24
46. Lada Калина	153400	14,0	5,5	+24
47. ВАЗ 21099	158500	14,5	6,0	+25
48. ВАЗ 2114	162700	14,4	5,7	+22
49. ВАЗ 2114	165000	14,2	4,9	+12
50. ВАЗ 2110	169386	14,0	5,8	-6
51. ВАЗ 2170	170000	13,8	6,0	-12
52. ВАЗ 21099	180000	14,3	6,2	-10
53. ВАЗ 2172	190500	14,2	6,0	-15
54. ВАЗ 2172	201000	14,0	5,9	-8
55. ВАЗ 2172	209000	14,4	6,2	-6
56. ВАЗ 2172	213000	14,4	6,4	-6
57. ВАЗ 2172	227000	14,0	6,6	-3
58. ВАЗ 2172	240000	14,3	6,6	-15
59. ВАЗ 2172	258900	14,2	6,6	-8
60. Нива	270000	14,8	7,0	-12

Таблица 11.3 – Результаты экспериментальных исследований диагностических параметров в условиях эксплуатации (неисправные генераторы)

Марка, модель автомобиля	Пробег автомобиля, км	Среднее значение напряжения, В	Размах колебаний напряжения, В
1	2	3	4
1. ВАЗ 2172	94000	14,2	8,60
2. Lada Калина	119000	15,4	15,6
3. ВАЗ 2110	128000	14,6	12,9
4. ВАЗ 2112	132000	14,0	9,20
5. Lada Калина	140000	14,5	9,80
6. ВАЗ 2170	157000	15,6	18,2
7. ВАЗ 2115	169400	14,9	13,0
8. ВАЗ 2114	180000	14,4	12,2
9. ВАЗ 2112	190500	14,7	12,4
10. ВАЗ 2110	208700	14,9	13,8
11. ВАЗ 2111	210000	15,3	11,1
12. ВАЗ 21099	223000	14,6	13,2
13. ВАЗ 2114	257000	14,8	14,5

§2 Определение достоверности предлагаемого метода диагностирования

Рассмотрим случай, когда контролируется один параметр x и известны его нижние и верхние предельные значения (x_{min}, x_{max}).

Если результат измерения x_n , то изделие будет годным к эксплуатации при $x_{min} \leq x \leq x_{max}$.

$$x_n = x + \Delta_x, \quad (11.1)$$

где x – измеренное значение параметра;

Δ_x – погрешность измерения параметра.

Могут произойти два независимых события:

- значение контролируемого параметра оказалось в диапазоне $x_{min} \leq x \leq x_{max}$;
- погрешность измерения очень велика и его результат лежит в одном из двух интервалов $(-\infty \leq x \leq x_{min}; x_{max} \leq x \leq \infty)$.

Вероятность погрешностей операций, при которых значение измеряемого параметра окажется за пределами допуска, будет равна:

$$P = \int_{x_{max}-x}^{\infty} f(\Delta) \cdot d(\Delta) + \int_{-\infty}^{x_{min}-x} f(\Delta) \cdot d(\Delta) \quad (11.2)$$

За счёт погрешности измерения образуются две зоны *I* и *II*, которые приводят к выбраковке работоспособных генераторов или к пропуску неработоспособных.

Численно, достоверность диагностирования определяется по формуле:

$$D = 1 - (P_I - P_{II}), \quad (11.3)$$

где P_I и P_{II} – вероятности появления ошибок первого рода (годный параметр признан негодным) и второго рода (негодный параметр признан годным).

В общем виде вероятности ошибок *I* и *II* рода можно определить по следующим формулам

$$P_I = \int_{x_H}^{x_B} f(x) \left[\int_{-\infty}^{x_B-x_H} f(\Delta_x) dx \right] dx + \int_{x_H}^{x_B} f(x) \left[\int_{x_B-x_H}^{\infty} f(\Delta_x) dx \right] dx \quad (11.4)$$

$$P_{II} = \int_{-\infty}^{x_H-x} f(x) \left[\int_{x_H-x}^{x_B-x} f(\Delta_x) dx \right] dx + \int_{x_B-x}^{\infty} f(x) \left[\int_{x_H-x}^{x_B-x} f(\Delta_x) dx \right] dx \quad (11.5)$$

$$P_I + P_{II} = \int_{-\infty}^{\infty} P(x)f(x)dx , \quad (11.6)$$

где $f(x)$ – функция плотности вероятности распределения машин, поступающих на диагностирование.

Приближённо достоверность диагностирования, согласно Харазову А.М. можно определить, как [50]:

$$Д = 1 - 0,314 \cdot \beta_1 - 0,083 \cdot \beta_2 - 0,007 \cdot \beta_3 , \quad (11.7)$$

где β_j – относительное число машин, попавших в j -тое множество (рисунок 11.4):

$$S_{cp} - j \cdot \sigma \leq S_i \leq S_{cp} - (j - 1) \cdot \sigma . \quad (11.8)$$

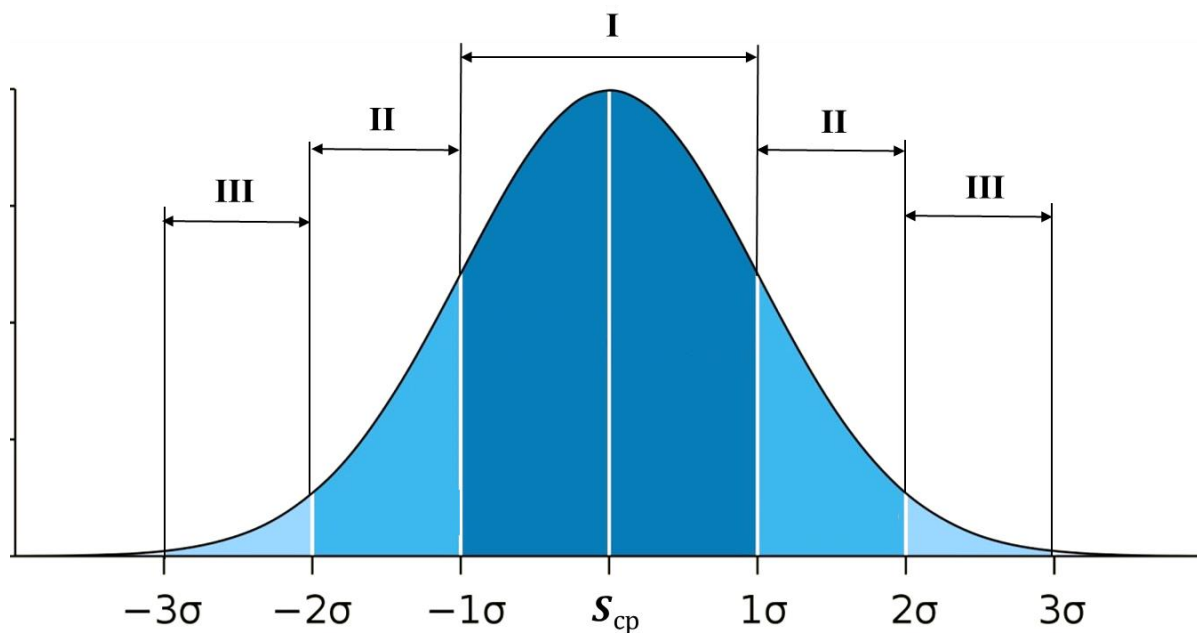


Рисунок 11.4 – Интервалы определения погрешностей диагностирования

Согласно центральной предельной теореме [8] погрешности измерения (диагностирования) формируются под влиянием нескольких слабо зависимых случайных факторов, их распределение считают нормальным.

Для закона нормального распределения погрешностей измерения среднеквадратическая погрешность измерения:

$$\sigma = 300^{-1} \cdot \delta \cdot (X_2 - X_1), \quad (11.9)$$

где δ – точность измерительного средства, %. Точность цифрового осциллографа Hantek DSO1062B, согласно паспортным данным, составляет $\delta=3\%$,

$(X_2 - X_1)$ – диапазон шкалы диагностического средства, соответствующий диапазону изменения диагностического параметра, $(X_2 - X_1) = 40$ В.

$$\sigma = 300^{-1} \cdot \delta \cdot (X_2 - X_1) = 300^{-1} \cdot 3 \cdot 40 = 0,4 \text{ В}$$

$$\beta_j = m_j/n, \quad (11.10)$$

где m_j – число машин, попавших в j -тое множество. Согласно распределению диагностического параметра (таблица 11.2), среднее значение – $S_{\text{ср}} = 4,37$ В, число машин, попавших в j -тое множество составило $m_1 = 12, m_2 = 12, m_3 = 7$;

n – суммарное число диагностируемых машин, $n = 60$.

$$\beta_1 = 12/60 = 0,2; \quad \beta_2 = 12/60 = 0,2; \quad \beta_3 = 7/60 = 0,117.$$

Достоверность диагностирования (11.7) составила:

$$D = 1 - 0,314 \cdot 0,2 - 0,083 \cdot 0,02 - 0,007 \cdot 0,117 = 0,92$$

§3 Выводы по главе

Разработан экспресс-метод определения технического состояния генератора по параметру размаха колебаний выходного напряжения. Согласно результатам диагностирования, данный параметр позволяет прогнозировать изменение технического состояния генератора под влиянием условий эксплуатации. Данный метод повысил достоверность диагностирования до 92%.

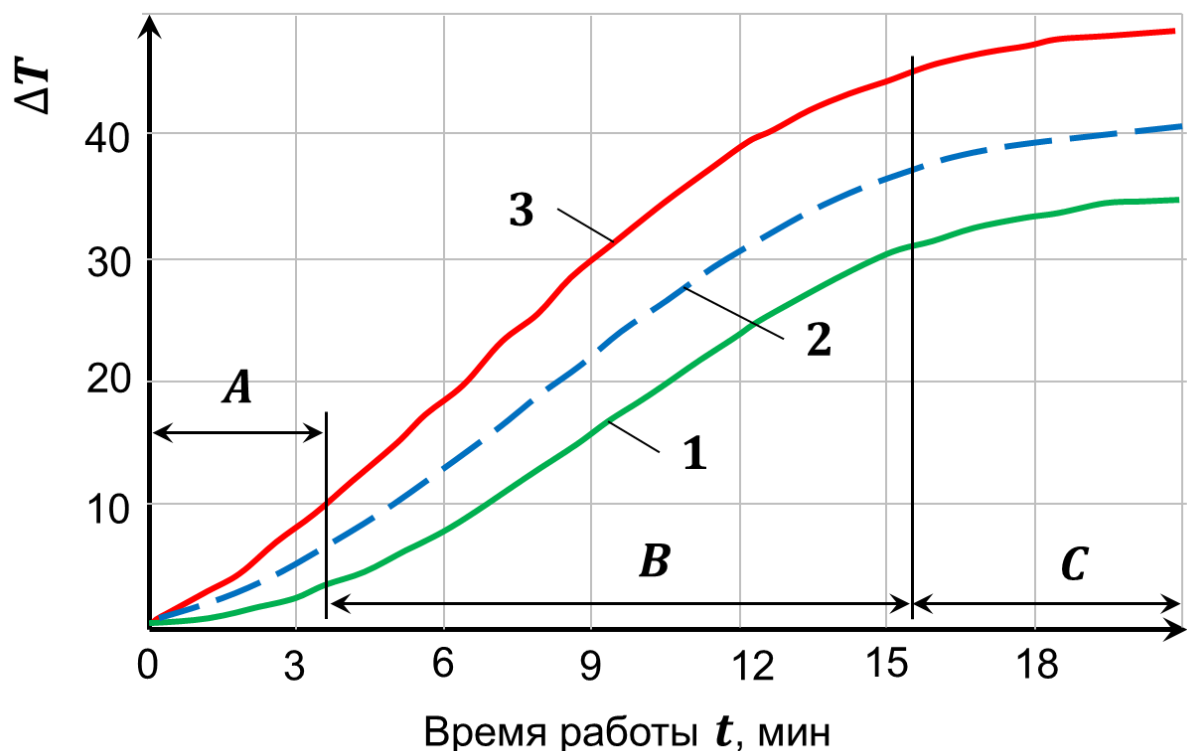
Глава 12 Методика определения теплового состояния автомобильных генераторов

Целью эксперимента является установление влияния температуры наружного воздуха, скорости автомобиля, мощности подключённых электропотребителей и частоты вращения ротора на тепловое состояние генератора.

Тепловое состояние автомобильных генераторов обусловлено совокупным влиянием одновременно протекающих быстропеременных процессов нагревания и охлаждения.

При наличии постоянных нагрузок и скоростных режимов, техническое состояние генератора может характеризовать закономерности изменения температур при запуске. Различают три временные фазы (рисунок 12.1), соответствующие неупорядоченному нагреву **А**, регулярному тепловому режиму **В** и выходу на стационарный тепловой режим **С**.

Фаза неупорядоченного нагрева имеет случайный характер в период запуска, поэтому её не используют для получения информации о техническом состоянии. Стационарный режим, при котором достигается тепловое равновесие, неинформативен, так как выход объекта диагностирования на этот режим требует значительного времени и точного контроля температуры – часто разница температур в этом режиме у исправных и неисправных генераторов незначительна. В связи с этим информацию получают во второй фазе нагрева, когда температура возрастает до некоторого граничного значения.



1 — исправный генератор, 2 — предел исправности, 3 — неисправный генератор

Рисунок 12.1 – Характер изменения теплового состояния генератора

Интенсивность нарастания температуры у неисправного генератора будет выше, чем у исправного. Для информации об интенсивности нарастания температуры достаточно провести два последовательных измерения: на начальном участке фазы теплового режима и спустя

некоторое время. Допустимая интенсивность нагрева генератора в период выхода на стационарный тепловой режим $+ 0,5 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$.

Контроль температуры позволяет получить следующие диагностические параметры: абсолютное значение в локальных точках; интенсивность нарастания температуры при запуске.

§1 Методика определения теплового состояния автомобильных генераторов в лабораторных условиях

В процессе выполнения эксперимента на специализированном стенде, на корпус генератора 9402.3701 (мощность 1250 Вт, устанавливаются на автомобили ВАЗ) закреплялся датчик температуры ИТ2-К-01 (таблица 12.1), место расположения показано на рисунке 12.2, а индикатор температуры выведен на приборную панель стенда.

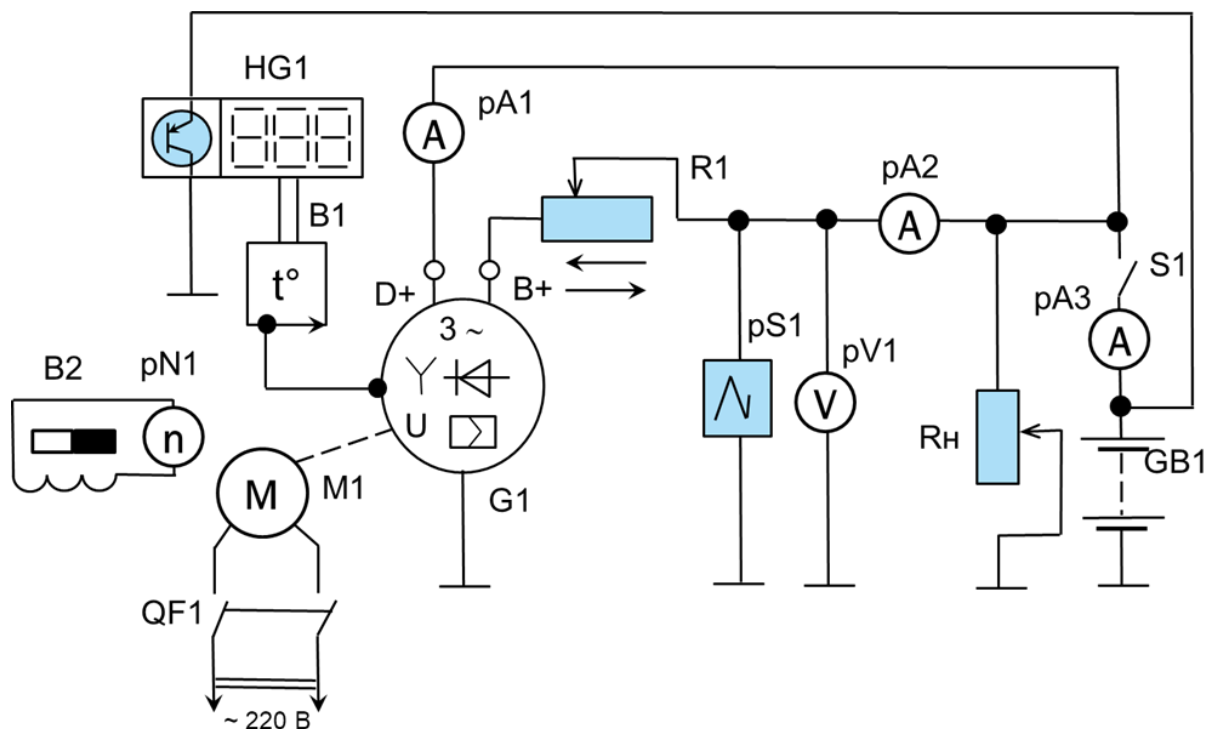
Для определения температурной напряжённости на корпус генератора закреплялся полупроводниковый датчик температуры ИТ2-К-01 (таблица 12.1), индикатор которого выведен на приборную панель стенда.

Таблица 12.1 – Техническая характеристика датчика температуры

Диапазон измерений, $^{\circ}\text{C}$	от минус 55°C до плюс 300°C
Напряжение питания, В	от 8 до 30 В
Ток потребления, мА	30
Дискретность	$0,1^{\circ}\text{C}$ в диапазоне $(-55 - 99,9^{\circ}\text{C})$ 1°C в диапазоне $(100 - 300^{\circ}\text{C})$
Погрешность, не более, $^{\circ}\text{C}$	1,0
Температура эксплуатации индикатора, $^{\circ}\text{C}$	от минус 40°C до плюс 85°C



Рисунок 12.2 – Расположение датчика и индикатора температуры



B1 – датчик температуры генератора, B2 – датчик частоты вращения; G1 – испытываемый генератор, GB1 – аккумуляторная батарея, HG1 – индикатор температуры, M1 – электродвигатель, QF1 – автоматический выключатель, pA1 – pA2 – амперметры, pV1 – вольтметр, pN1 – тахометр, pS1 – осциллограф, R1 – лабораторный реостат, S1 – выключатель АКБ

Рисунок 12.3 – Схема подключения для измерения температуры

Эксперимент проводился в следующей последовательности. Вначале устанавливалась фиксированная мощность потребителей и частота вращения ротора генератора ($P = 50 - 500$ Вт, $n = 1000 - 3000$ мин⁻¹). Эти факторы определяют соответственно объём тепловой энергии, выделяемой в генераторе и эффективность её отвода, а вместе – тепловое состояние генератора.

Для каждого из фиксированных значений определялась конечная температура нагрева в стационарном режиме. При изменении температуры на 1°C, фиксировалось время, что позволило установить темп нагрева генератора (таблица 12.2).

Темп прогрева описывается выражением:

$$m = \Psi \frac{\alpha \cdot F}{C \cdot M}, \quad (12.1)$$

где m – темп прогрева, 1/с;

Ψ – коэффициент неравномерности распределения температуры;

α – коэффициент теплоотдачи с поверхности генератора, Вт/м²·К;

F – площадь поверхности генератора, м²;

C – теплоёмкость генератора, Дж/кг·К;

M – масса генератора, кг.

Точка T_y соответствует максимальному нагреву при штатной работе генератора. И в ходе дальнейших экспериментов фиксировалась именно она.

Таблица 12.2 – Изменение температуры генератора

Температура генератора, °C	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
Время нагрева, с	0	21	29	42	61	75	90	108	127	143

Температура генератора, °C	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44
Время нагрева, с	163	181	201	228	262	278	305	332	364	397

Температура генератора, °C	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
Время нагрева, с	452	464	502	545	589	641	693	774	779	911

Температура генератора, °C	55	56	57	58	59	60	59	58
Время нагрева, с	993	1093	1200	1217	1232	1249	1330	1456

§2 Методика определения теплового состояния автомобильных генераторов в производственных условиях

Определение теплового состояния автомобильного генератора сводится к измерению температуры поверхности корпуса узла. Для определения температуры использовался полупроводниковый датчик ИТ2-К-01. Он закреплялся на корпусе генератора, информирование о значении текущей температуры, осуществлялось при помощи индикатора датчика, выведенного в салон автомобиля (рисунок 12.4).

Помимо температуры, в ходе проведения эксперимента, осуществлялся мониторинг частоты вращения коленчатого вала (КВ) двигателя внутреннего сгорания и скорости автомобиля. Для определения скорости автомобиля и частоты вращения коленчатого вала использовались штатные приборы автомобиля, их значения через разъем DLC3 (OBD-II) с

помощью адаптера ELM327-WiFi выводились на экран портативного компьютера (программное обеспечение: OBD Fusion) (рисунок 12.5).

Для определения мощности потребителей использовались токовые клещи Hantek CC-650, характеристика которых приведена в таблице 12.3.

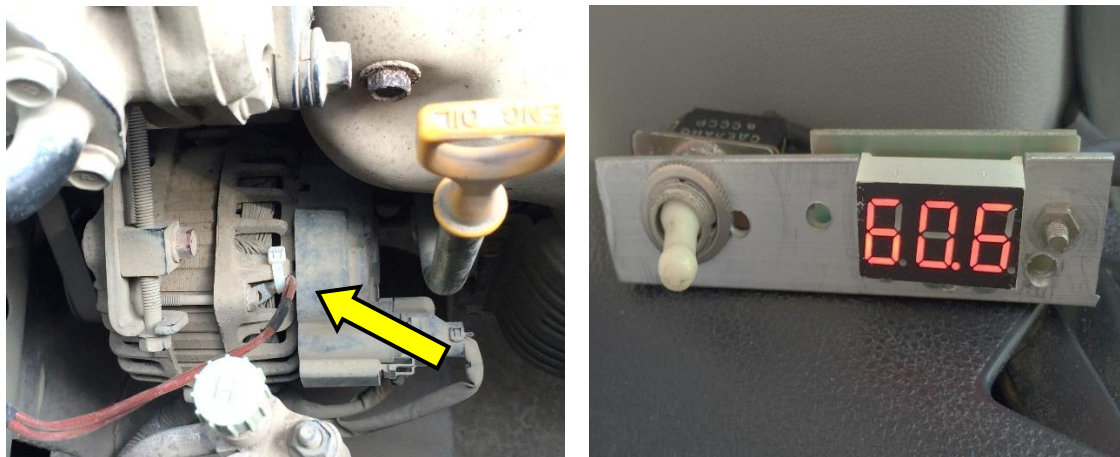
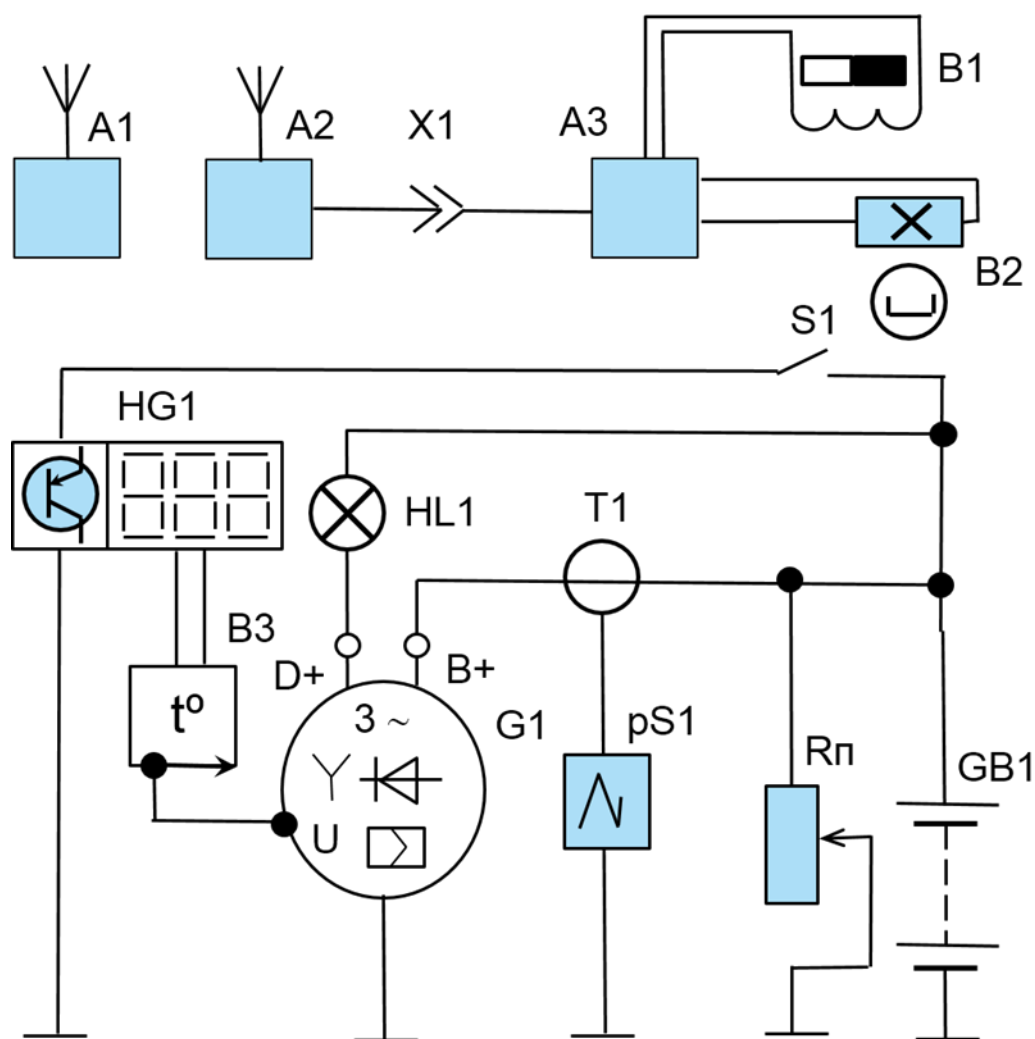


Рисунок 12.4 – Расположение датчика и индикатора при проведении производственных испытаний

Таблица 12.3 – Характеристика токовых клещей Hantek CC-650

Максимальная частота:	400 Гц
коэффициент:	1мВ/1А, 1мВ/100мА
Диапазон измерения:	20мА – 650А DC
Точность	0-650А $\pm 3\%$ + 2А
Диаметр проводника	30мм максимум
Рабочая температура	от 0 °С до 50 °С 70% R.H.
Температура хранения	от минус 20 °С до плюс 70 °С, 80% R.H.

Отличием автомобильных генераторов является непрерывное изменение частоты вращения, электрической нагрузки и теплового воздействия, как окружающей среды, так и агрегатов подкапотного пространства. Несмотря на то, что генератор, как правило, работает непрерывно (за исключением машин, оборудованных системой СТАРТ-СТОП), характер изменения его теплового состояния эквивалентен электрическим машинам, работающим в повторно-кратковременном режиме.



A1 – планшетный компьютер; A2 – сканер ELM327 Wi-Fi; A3 – блок управления ДВС; B1 – датчик частоты вращения ДВС; B2 – датчик скорости автомобиля; B3 – датчик температуры генератора; G1 – испытуемый генератор; GB1 – аккумуляторная батарея; HG1 – индикатор температуры генератора; HL1 – контрольная лампа генератора; pS1 – цифровой осциллограф Hantek DSO1062B; Rп – задействованные потребители; S1 – выключатель индикатора температуры; T1 – токоизмерительные клещи Hantek CC-650; X1 – диагностический разъем DLC3.

Рисунок 12.5 – Схема определения темпового состояния генератора в процессе производственных испытаний

Таблица 12.4 – Результаты оценки теплового состояния автомобильного генератора в городском цикле движения

T, °C	V, км/ч	n, мин ⁻¹	t, мин	T, °C	V, км/ч	n, мин ⁻¹	t, мин	T, °C	V, км/ч	n, мин ⁻¹	t, мин
30	10,2	968	0,00	46	30,8	1106	7,36	62	47,1	2228	13,26
31	15,2	2470	0,05	47	27,3	2355	7,41	61	0,0	699	14,49
32	25,3	1237	0,20	48	48,2	2302	7,48	60	0,0	714	14,57
33	28,0	1825	0,34	49	61,1	2401	7,53	59	27,6	2027	15,05
34	30,1	1410	0,51	50	50,0	2191	7,58	60	40,9	1873	15,15
35	30,3	1454	0,59	51	30,7	736	8,05	61	32,0	1660	15,22
36	18,0	766	1,08	50	0,0	730	8,25	62	27,0	1517	15,31
35	34,6	1900	2,13	51	45,0	2097	8,42	63	45,0	2046	15,38
36	41,1	2426	2,17	52	48,0	2288	8,47	64	5,9	712	15,53
37	61,1	2384	2,36	53	48,0	2268	8,50	63	0,0	691	15,56
36	72,0	2740	2,59	54	42,0	1825	9,01	62	0,0	716	16,07
35	67,0	1397	3,11	55	41,3	1935	9,14	61	0,0	725	16,16
36	35,0	1616	3,37	54	15,0	730	9,40	60	0,0	774	16,29
37	30,0	1266	3,50	53	12,0	2280	9,54	59	0,0	710	16,45
38	18,0	1373	4,38	54	32,0	921	10,15	60	7,9	741	17,00
39	48,0	2265	4,52	55	11,8	706	10,25	59	0,0	718	17,25
40	48,8	2275	4,57	54	0,0	717	10,36	60	1,3	841	17,50
41	51,0	2355	5,02	53	10,0	1669	10,49	61	33,1	1828	18,04
42	50,9	1785	5,07	54	23,0	1640	11,00	62	42,1	2033	18,07
43	30,0	1492	5,15	55	41,0	1902	11,07	63	46,0	2117	18,11
44	28,0	868	5,21	56	46,0	1997	11,11	64	47,0	2160	18,17
45	47,0	2162	6,02	57	37,9	725	11,16	65	50,0	2301	18,21
46	52,0	2026	6,07	58	50,0	2346	11,39	64	50,0	1887	18,42
47	66,0	2588	6,20	59	46,0	2133	11,51	63	51,0	2416	18,55
46	71,8	2714	6,29	60	17,0	719	12,04	62	53,0	2510	19,08
45	70,0	2671	6,36	59	21,9	1732	12,11	61	37,9	1745	19,31
44	66,0	2638	6,38	60	34,8	1026	12,26	62	36,9	1728	19,44
43	48,6	716	6,52	61	45,0	2067	12,49	61	61,0	884	20,10
44	40,9	1896	7,27	62	17,3	2622	13,13	60	61,9	723	20,13
45	31,7	1477	7,34	61	27,5	2230	13,17	61	42,0	1990	20,54

В процессе эксперимента определялось влияние на тепловое состояние генератора следующих факторов:

- температуры окружающей среды (в диапазоне от минус 25°C до плюс 38°C);
- мощности потребителей (в диапазоне от 150 до 560 Вт);

– частоты вращения коленчатого вала (в диапазоне от 1100 до 4500 мин⁻¹), что эквивалентно изменению частоты вращения ротора генератора от 2750 до 11250 мин⁻¹;

– скорости движения автомобиля (в диапазоне от 20 до 120 км/ч).

Последовательность проведения эксперимента по определению теплового состояния генератора в производственных условиях следующая:

1. Автомобиль выдерживается под навесом (для исключения прямого воздействия солнечной радиации) до уравнивания температуры генератора и температуры окружающего воздуха (температура окружающего воздуха отображается на дисплее бортового компьютера, а температура генератора – на индикаторе температуры, сопряжённом с датчиком ИТ2-К-01).

2. Производится подключение адаптера ELM327-WiFi к разъёму DLC3 и осуществляется соединение с портативным компьютером. Для сохранения и повторного воспроизведения полученных результатов осуществляется видеосъёмка экрана планшета и индикатора датчика температуры в режиме реального времени.

3. Включается бортовое электрооборудование автомобиля, при помощи токоизмерительных клещей определяется значение тока потребителей. Таким образом, определялся параметр мощность потребителей тока, производимого генератором. Различные значения силы тока устанавливались посредством включения различного оборудования. При помощи токоизмерительных клещей и цифрового осциллографа, была определена сила тока каждого потребителя. В таблице 12.5 представлено значение силы тока при различном сочетании включенного электрооборудования. При проведении эксперимента включалось только стандартное оборудование автомобиля, поэтому максимальное значение тока не превысило 50 Ампер.

Таблица 12.5 – Значения силы тока для потребителей электроэнергии

Значение силы тока	4	10	14	20	26	28	32	36
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Вентилятор системы охлаждения двигателя	–	–	–	–	–	–	–	+
Внешние световые приборы	–	–	–	–	–	–	+	+
Обогрев сидений и стекла	–	–	–	–	+	+	+	+
Задний противотуманный фонарь	–	–	–	–	–	–	–	+
Аварийная световая сигнализация	–	–	–	–	–	+	+	+
Печка	–	–	+	+	+	+	+	+
Приборы	–	+	+	+	+	+	+	+
Кондиционер	–	–	–	+	+	+	+	+

4. Осуществляется движение автомобиля с постоянной скоростью на требуемой передаче в течение 20 минут для выхода генератора на стационарный режим нагрева. Для исключения возмущающего воздействия остановок и замедлений движение производится по загородной дороге, не имеющей пересечений в одном уровне.

Эксперимент повторялся при различных скоростях движения, частотах вращения ДВС и мощностях задействованных потребителей в вышеуказанных диапазонах изменения. Результаты эксперимента представлены в таблицах 12.6 – 12.9.

Таблица 12.6 – Зависимость теплового состояния автомобильного генератора от температуры окружающего воздуха

Температура окружающего воздуха, °С	Температура обмотки статора генератора, °С
-25	0,5
-20	21,1
-10	46,4
0	65,0
10	78,7
20	90,3
30	100
40	110

Таблица 12.7 – Зависимость теплового состояния автомобильного генератора от силы тока задействованных потребителей

Сила тока задействованных потребителей, А	Температура обмотки статора генератора, °С
10	56,7
20	63,3
30	72,0
40	84,4

Таблица 12.8 – Зависимость теплового состояния автомобильного генератора от скорости движения автомобиля

Скорость движения автомобиля, км/ч	Температура обмотки статора генератора, °С при частоте вращения ДВС, п, 1/мин		
	2000	3000	4000
34	72,1	-	-
48	68,5	60,7	55,6
59	66,3	56,8	-
70	62,5	-	47,4
80	-	50,2	-
100	-	-	38,7

Таблица 12.9 – Зависимость теплового состояния автомобильного генератора от частоты вращения ДВС (ротора генератора)

Частота вращения ДВС (ротора генератора), 1/мин	Температура обмотки статора генератора, °С при скорости движения автомобиля, v, км/ч			
	40	60	80	100
1100 (2750)	80	-	-	-
1400 (3500)	77	-	-	-
1600 (4000)	74	-	-	-
1700 (4250)	-	69	-	-
2100 (5250)	-	65	-	-
2200 (5500)	-	-	58	-
2500 (6250)	67	61	-	-
2800 (7000)	-	-	52	-
2900 (7250)	-	-	-	47,5
3500 (8750)	-	-	46	-
3600 (9000)	-	-	-	40,2
4000 (10000)	-	50	-	-
4500 (11250)	-	-	-	36,9

§3 Выводы по главе

Результаты экспериментального исследования теплового состояния генератора в лабораторных условиях показали, что оно обусловлено мощностью потребителей (характеризует объём тепловой энергии, выделяемой в генераторе) и частотой вращения ротора (определяет эффективность отвода тепла от наружной поверхности).

В результате определения теплового состояния генератора в условиях эксплуатации было установлено, что температура генераторов повышается при частых остановках, установке дополнительного оборудования, снижении скорости движения и частоты вращения ротора.

Экспериментально определены зависимости теплового состояния от климатических (температура окружающего воздуха) и эксплуатационных (скоростной режим и мощность потребителей) факторов.

Часть 5 Анализ результатов экспериментальных исследований

Глава 13 Анализ результатов определения взаимосвязи диагностических и структурных параметров

§1 Обрыв диода выпрямителя

Представим в графическом виде зависимость между структурным и диагностическими параметрами в процессе физического моделирования обрыв цепи одного из диодов выпрямительного блока (рисунок 13.1). На рисунке 13.1 точками показаны экспериментальные данные, а линиями – уравнения регрессии, описывающие полученные результаты.

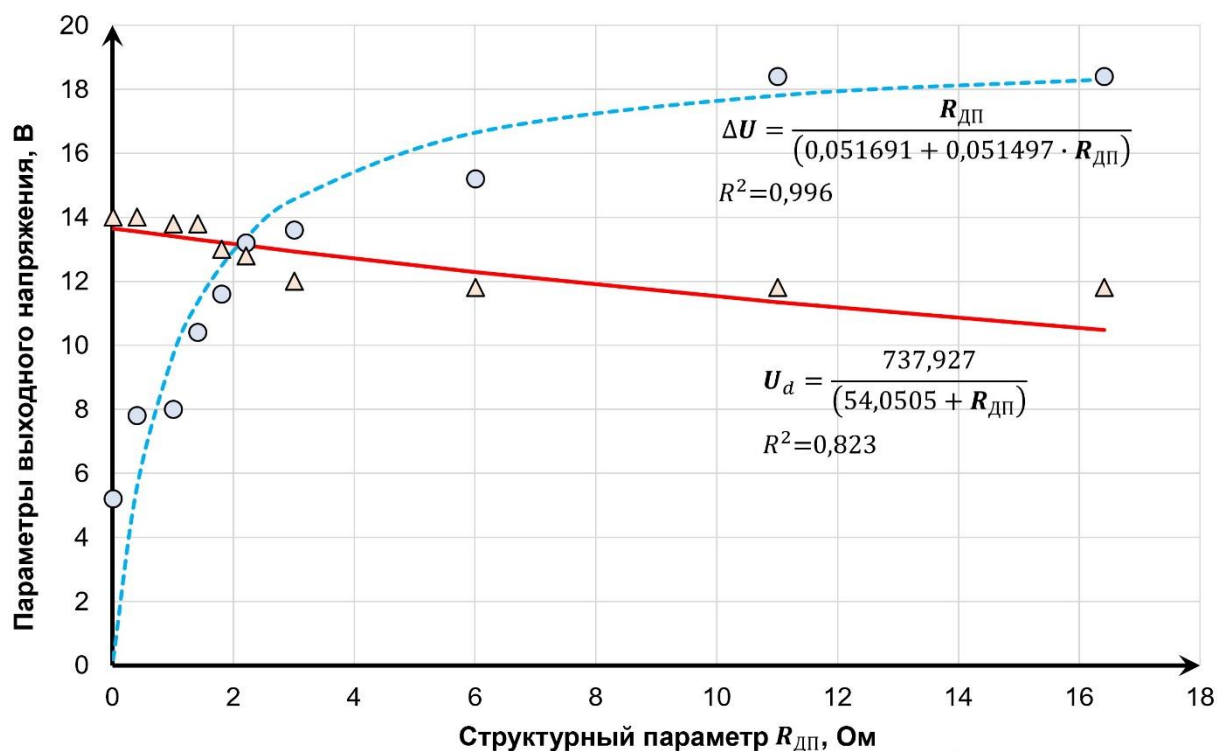


Рисунок 13.1 – Изменение параметров выходного напряжения при изменении структурного параметра (при моделировании обрыва цепи диода)

Увеличение сопротивления реостата сопровождается изменением формы выходного напряжения, причём его амплитуда практически не изменяется. Достижение сопротивлением реостата величины $250r$, (r – номинальное сопротивление диода в прямом направлении) приводит к обрыву цепи данного диода.

Общий вид зависимости выходного напряжения U_d от величины структурного параметра $R_{дп}$ не противоречит выражению (6.18), следовательно, экспериментально подтверждена взаимосвязь структурного и диагностического параметра. Для подтверждения выражения (6.20) построим зависимость размаха колебаний от среднего значения выходного напряжения (рисунок 13.2).

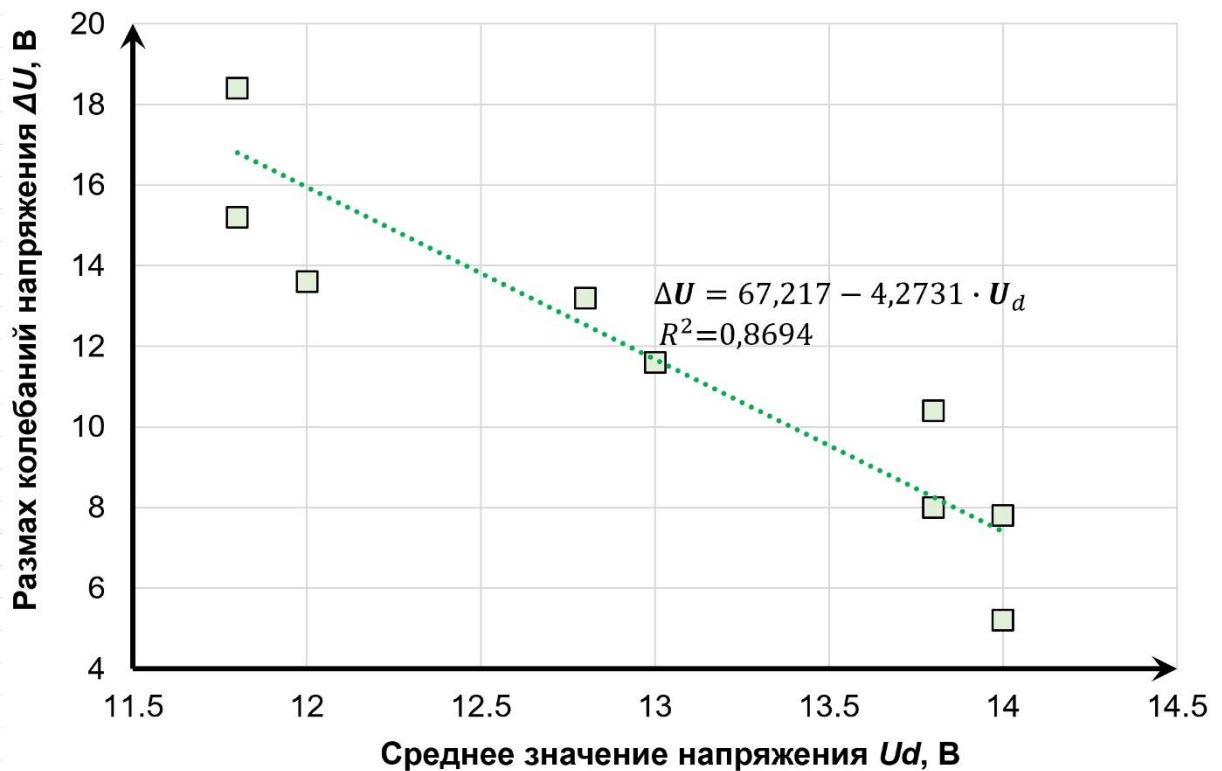


Рисунок 13.2 – Зависимость размаха колебаний от среднего значения напряжения

Выражение, аппроксимирующее экспериментальные значения, с достаточной достоверностью описывается линейной зависимостью, полностью подтверждая общий вид выражения (6.20).

Следовательно, экспериментально подтверждён выбор в качестве основного диагностического параметра размаха колебаний выходного напряжения, как наиболее чувствительного к возникающим в процессе работы неисправностям генератора.

Для установления границ возникновения и стадий развития неисправностей генератора воспользуемся анализом Парето, поскольку форму полученных зависимостей между структурным и диагностическими параметрами можно описать формулой стандартного распределения Парето:

$$f(x) = c/x^{c+1}, \quad (13.1)$$

где $f(x)$ – функция плотности распределения Парето;

c – параметр (формы) распределения, $c > 0, x \geq 1$.

На рисунке 13.3 приведён пример нахождения границ начальной, промежуточной и конечной стадий, установление границ между которыми подтверждается изменением характера осциллограмм выходного напряжения. Развитие неисправностей подразумевает изменение вероятности обнаружения неисправности со временем и деградацию функциональных возможностей генератора.

Средняя ошибка аппроксимации, $\bar{A}$ составит [16]:

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum \left| \frac{(y_i - \hat{y}_x)}{y_i} \right| \cdot 100\%, \quad (13.2)$$

где y_i – фактическое значение параметра;

$\hat{y}_x$ – теоретическое (рассчитанное по кривой регрессии) значение параметра;

n – число измерений.

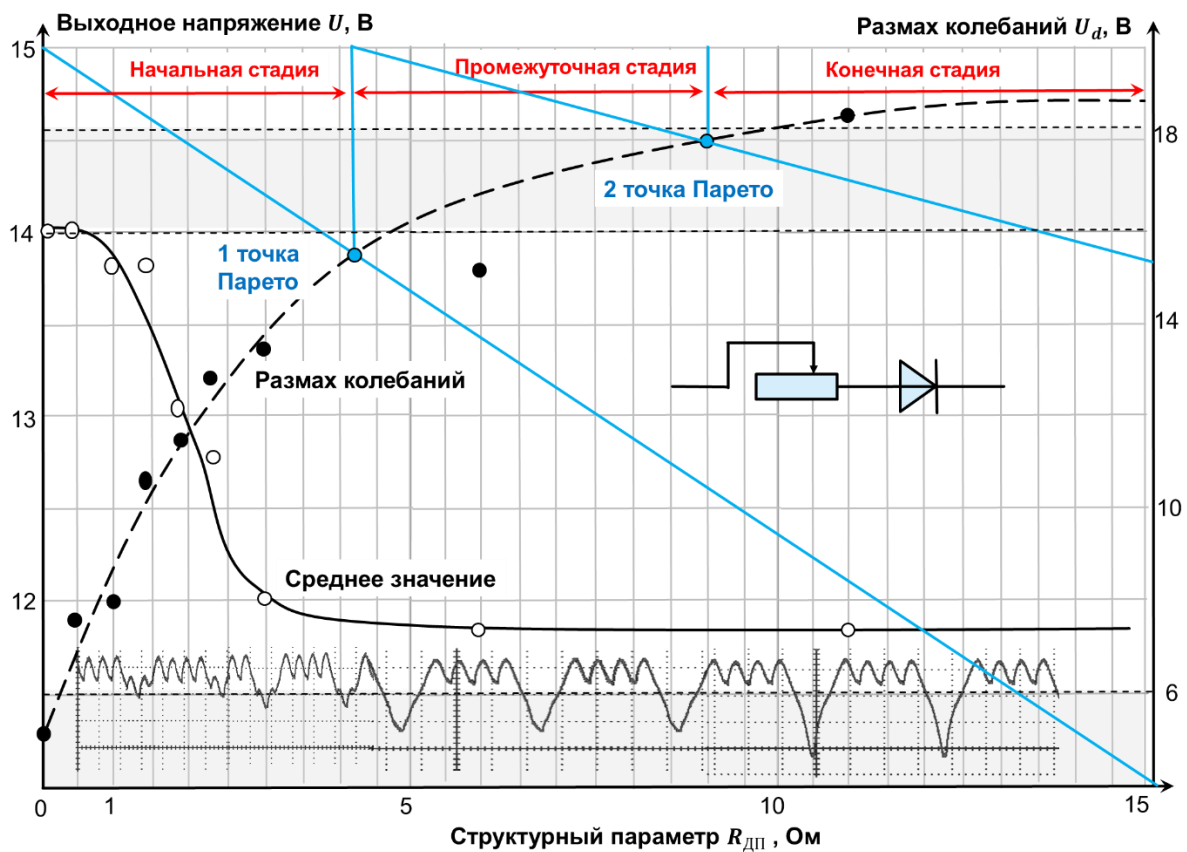


Рисунок 13.3 – Определение границ возникновения и стадий развития неисправности (на примере обрыва цепи диода выпрямителя)

Ошибка аппроксимации в пределах 5 – 7% свидетельствует о хорошем подборе модели к исходным данным. Допустимый предел значений A не более 8 – 10%.

Основные статистические характеристики уравнения регрессии (на примере обрыва цепи диода) приведены в таблице 13.1

Согласно данным таблицы 13.1, уравнение регрессии, аппроксимирующее экспериментальные данные, признается адекватным, так как $F_{расч} > F_{табл}$, а ошибка аппроксимации удовлетворительной.

Таблица 13.1 – Основные статистические характеристики регрессионных зависимостей между структурным и диагностическими параметрами генератора

Наименование характеристики	Значения для регрессионных зависимостей	
	размаха колебаний напряжения	среднего значения напряжения
Коэффициент корреляции	0,862	-0,767
Дисперсионное отношение Фишера	23,21	11,43
Критерий Фишера $F_{0.95}$	4,96	4,96
Средняя ошибка аппроксимации, %	2,88	3,65

§2 Обрыв обмотки ротора

Результаты физического моделирования обрыва обмотки ротора показаны на рисунке 13.4, из которого следует, что увеличение сопротивления цепи приводит к уменьшению магнитного потока, что сопровождается уменьшением амплитуды выходного напряжения.

Достижение сопротивлением реостата величины $1,25 r$, (r – номинальное сопротивление обмотки ротора) приводит к развозбуждению генератора и потере им способности вырабатывать напряжение. Увеличение сопротивления цепи обмотка ротора – щёткодержатель практически не отражается на форме осциллограммы и не увеличивает размаха колебаний напряжения.

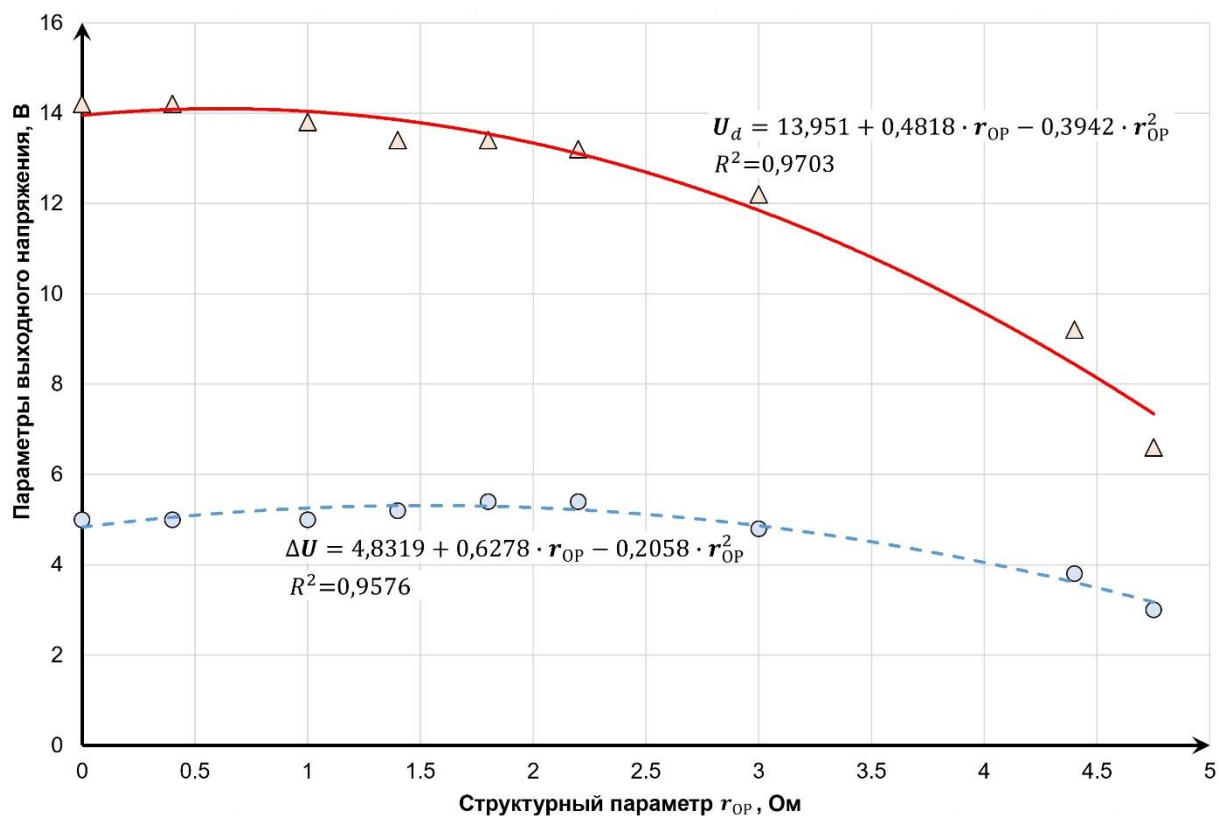


Рисунок 13.4 – Изменение диагностических параметров при изменении структурного параметра (при моделировании обрыва обмотки ротора)

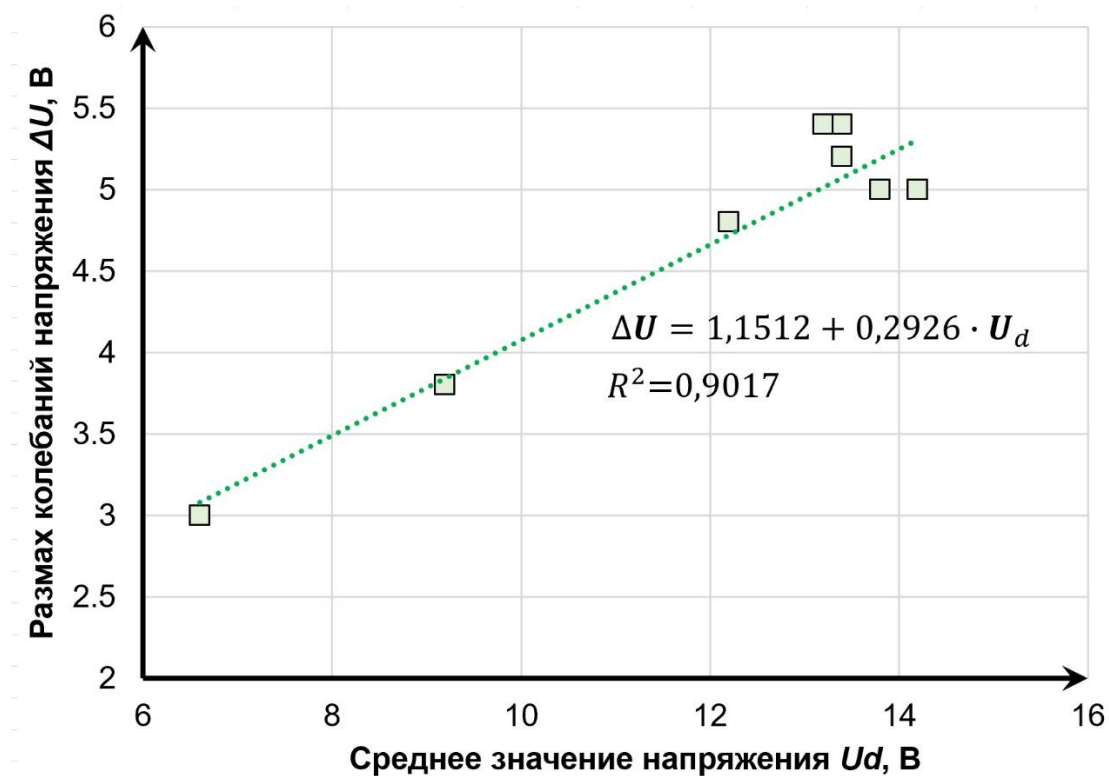


Рисунок 13.5 – Зависимость размаха колебаний от среднего значения напряжения (при обрыве обмотки ротора)

Основные статистические характеристики уравнения регрессии (на примере обрыва обмотки ротора) приведены в таблице 13.2.

Таблица 13.2 – Основные статистические характеристики регрессионных зависимостей между структурным и диагностическими параметрами генератора

Наименование характеристики	Значения для регрессионных зависимостей	
	размаха колебаний напряжения	среднего значения напряжения
Коэффициент корреляции	-0,786	-0,923
Дисперсионное отношение Фишера	11,3	40,24
Критерий Фишера $F_{0.95}$	4,96	4,96
Средняя ошибка аппроксимации, %	5,6	2,65

Согласно данным таблицы 13.2, уравнение регрессии, аппроксимирующее экспериментальные данные, признается адекватным, так как $F_{\text{расч}} > F_{\text{табл}}$, а ошибка аппроксимации удовлетворительной.

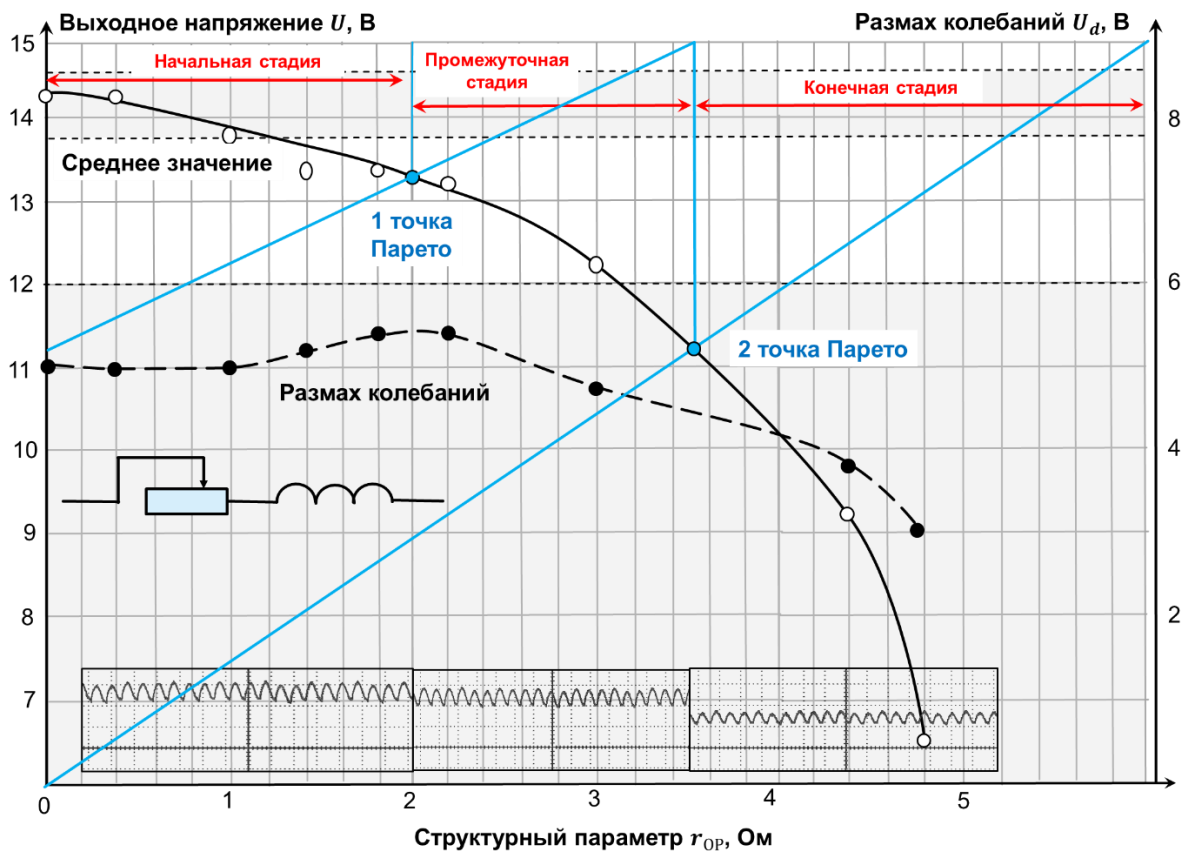


Рисунок 13.6 – Определение границ развития неисправности (на примере обрыва обмотки ротора)

§3 Межвитковое замыкание фазы обмотки статора

Результаты физического моделирования межвиткового замыкания фазы обмотки статора приведены на рисунке 13.7. Уменьшение сопротивления реостата сопровождается изменением величины и формы выходного напряжения. Достижение сопротивлением реостата величины $5r_{OC}$, (r_{OC} – номинальное сопротивление фазы статора) приводит к короткому замыканию данной фазы обмотки, генератор при этом продолжает работать, однако вырабатываемое им напряжение значительно уменьшается, что приведёт к недозаряду аккумуляторной батареи автомобиля.

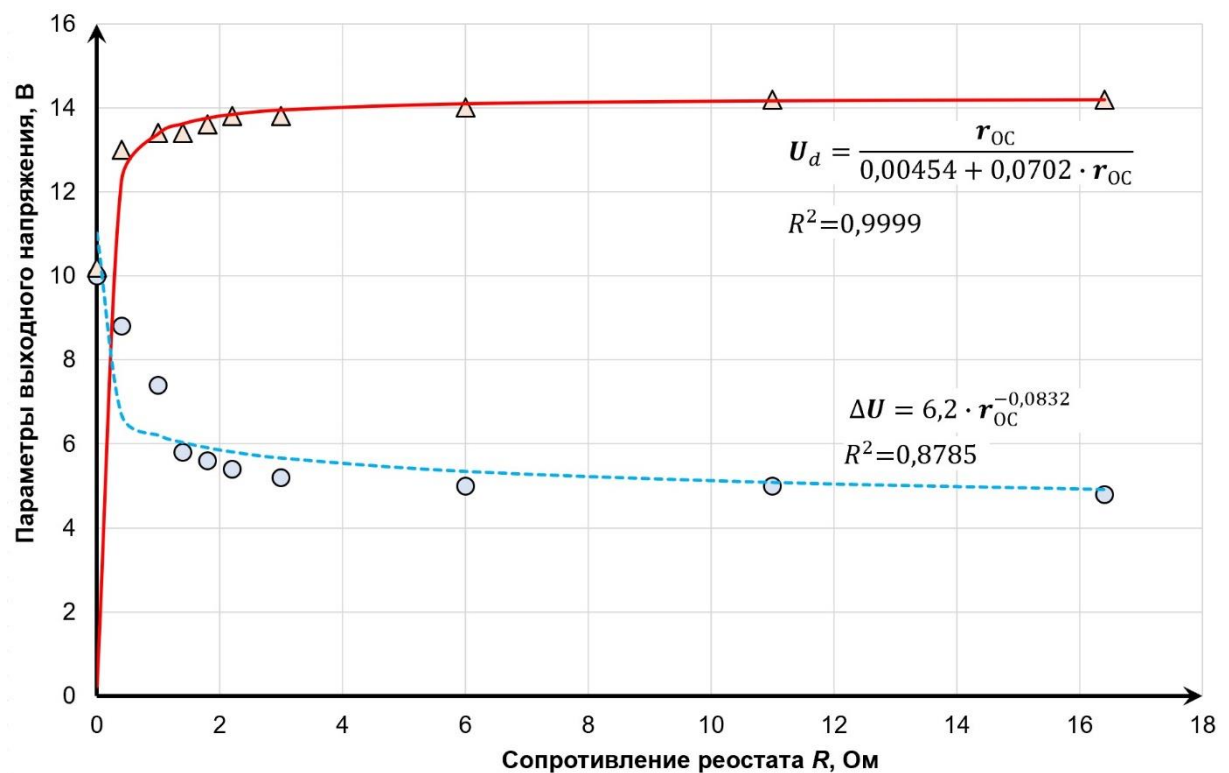


Рисунок 13.7 – Изменение диагностических параметров при изменении структурного параметра (при моделировании межвиткового замыкания фазы обмотки статора)

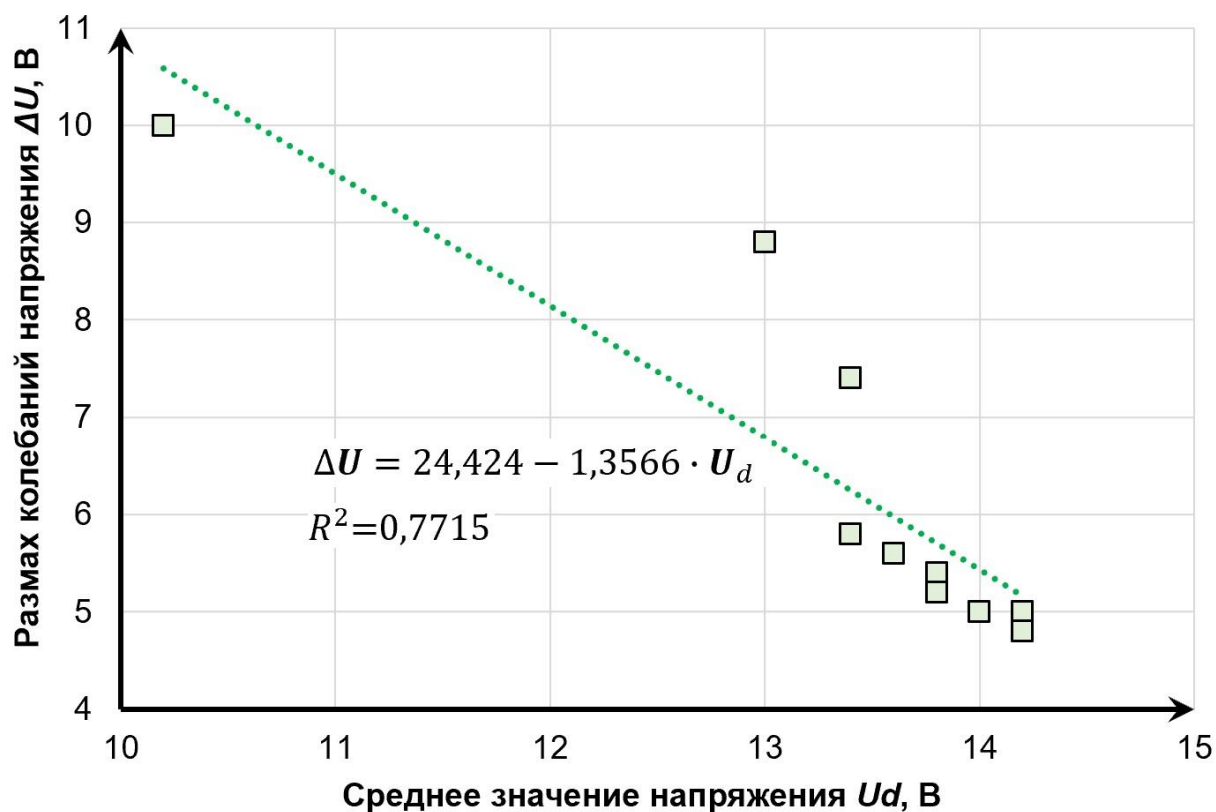


Рисунок 13.8 – Зависимость размаха колебаний от среднего значения напряжения (при моделировании межвиткового замыкания фазы обмотки статора)

Основные статистические характеристики уравнения регрессии (на примере обрыва обмотки ротора) приведены в таблице 13.3.

Таблица 13.3 – Основные статистические характеристики регрессионных зависимостей между структурным и диагностическими параметрами генератора

Наименование характеристики	Значения для регрессионных зависимостей	
	размаха колебаний напряжения	среднего значения напряжения
Коэффициент корреляции	-0,592	-0,521
Дисперсионное отношение Фишера	5,31	4,97
Критерий Фишера $F_{0.95}$	4,96	4,96
Средняя ошибка аппроксимации, %	4,59	4,86

Согласно данным таблицы 13.3, уравнение регрессии, аппроксимирующее экспериментальные данные, признается адекватным, так как $F_{\text{расч}} > F_{\text{табл}}$, а ошибка аппроксимации удовлетворительной.

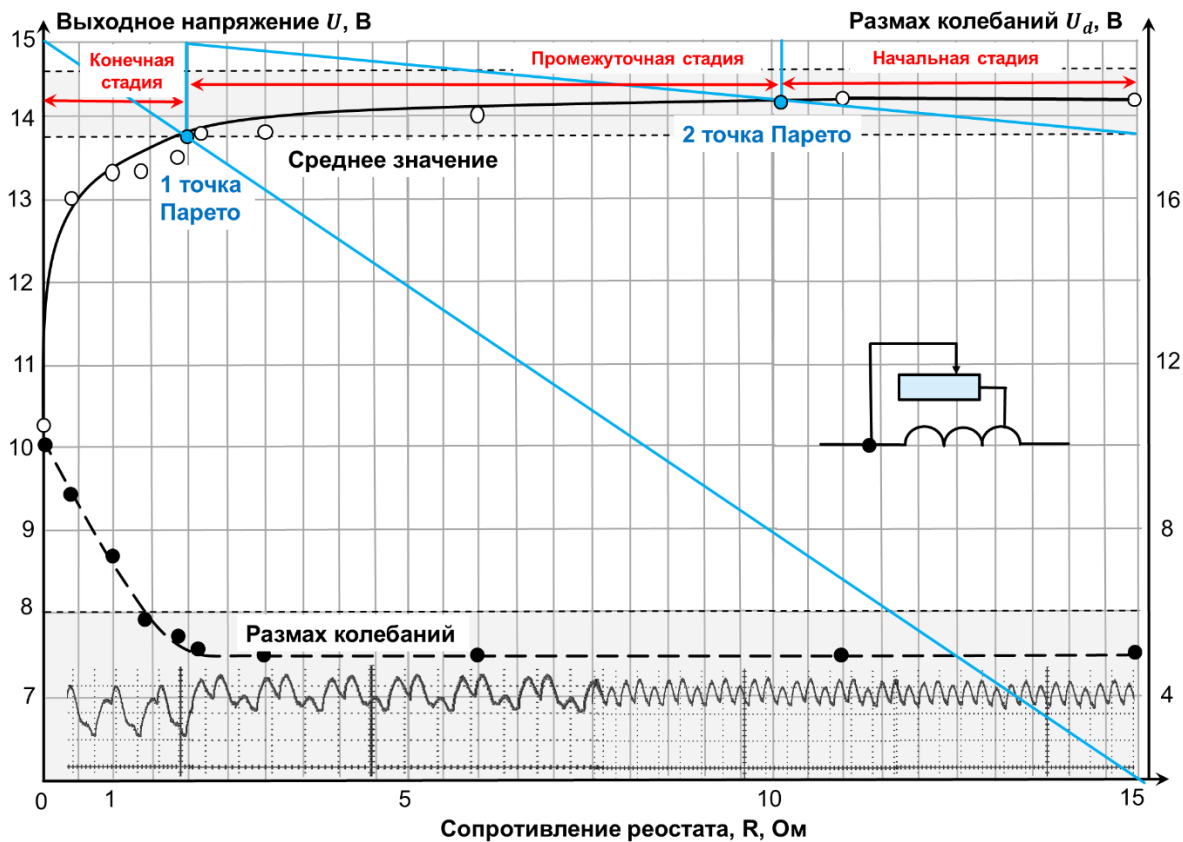


Рисунок 13.9 – Определение границ развития неисправности (на примере межвиткового замыкания фазы обмотки статора)

§4 Короткое замыкание диода

Результаты физического моделирования короткого замыкания диода приведены на рисунке 13.10. Увеличение сопротивления реостата сопровождается изменением величины и формы выходного напряжения. Достижение сопротивлением реостата величины $0,000025 r$, (r – исходное сопротивление диода в обратном направлении) приводит к короткому замыканию данного диода и по эффекту проявления (гул, нагрев) соответствует короткому замыканию фазы статора.

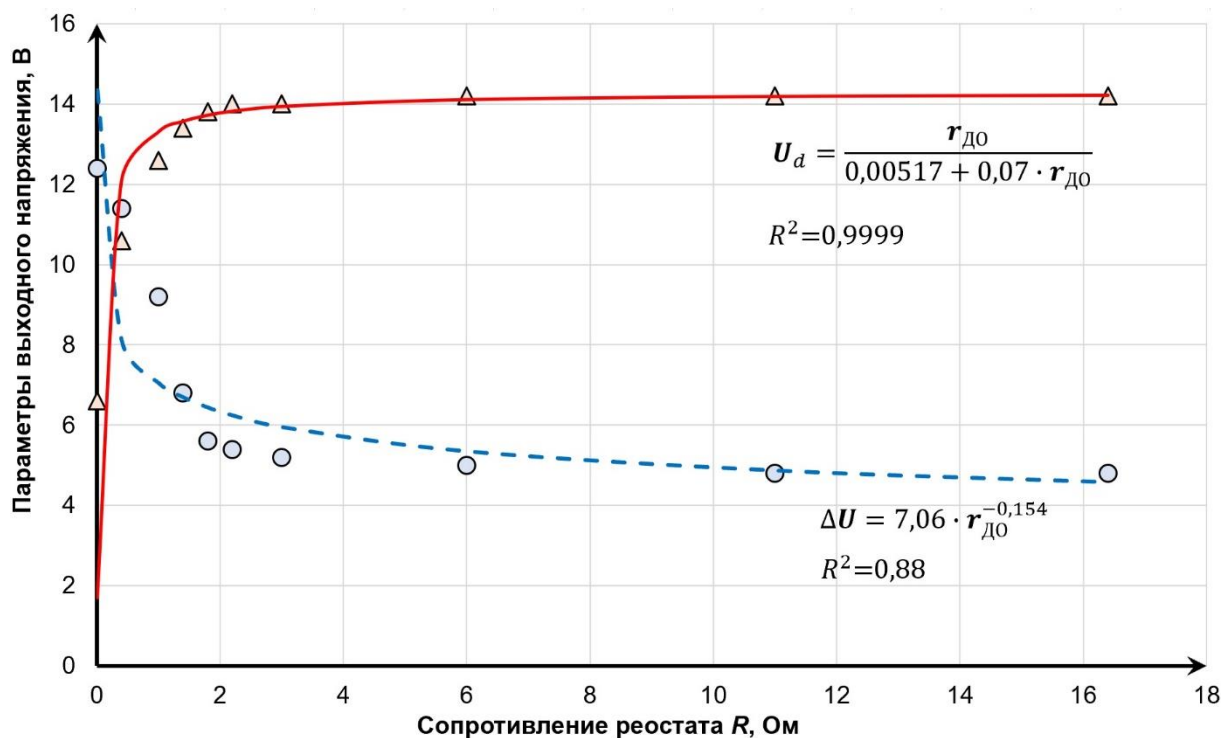


Рисунок 13.10 – Изменение диагностических параметров при изменении структурного параметра (при моделировании короткого замыкания диода)

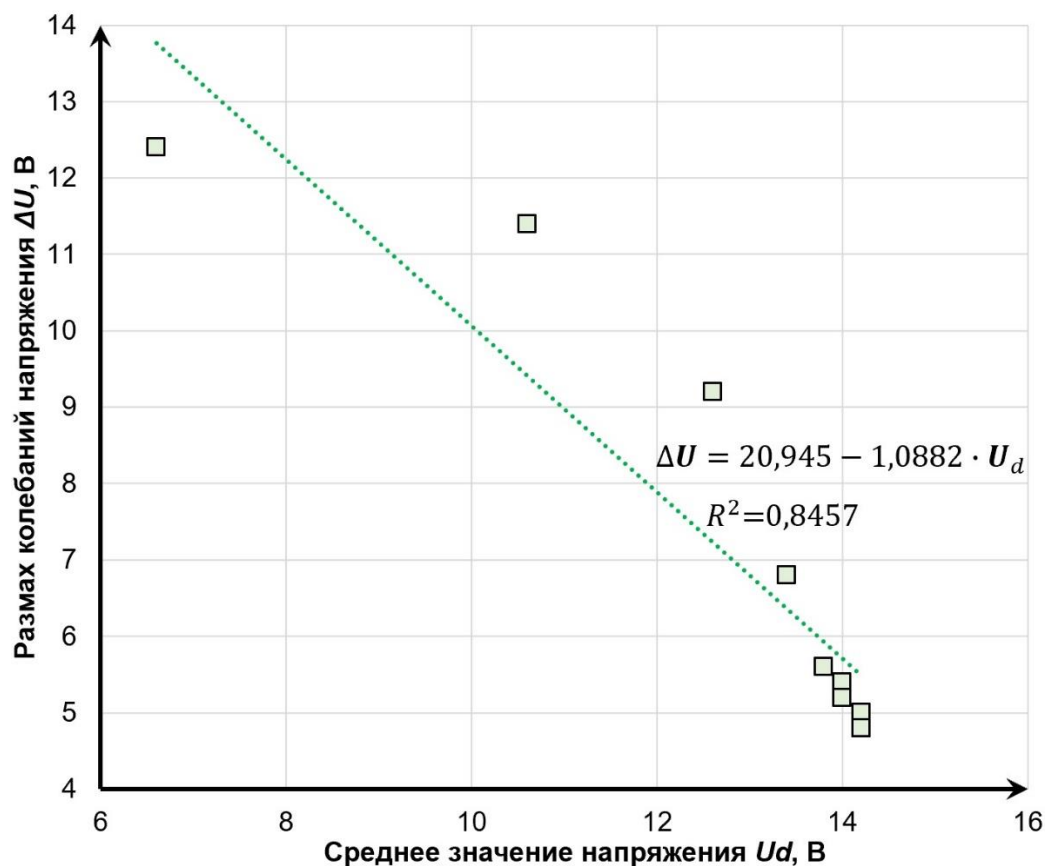


Рисунок 13.11 – Зависимость размаха колебаний от среднего значения напряжения (при коротком замыкании диода)

Основные статистические характеристики уравнения регрессии (на примере обрыва обмотки ротора) приведены в таблице 13.4.

Таблица 13.4 – Основные статистические характеристики регрессионных зависимостей между структурным и диагностическими параметрами генератора

Наименование характеристики	Значения для регрессионных зависимостей	
	размаха колебаний напряжения	среднего значения напряжения
Коэффициент корреляции	-0,593	-0,577
Дисперсионное отношение Фишера	5,33	5,07
Критерий Фишера $F_{0,95}$	4,96	4,96
Средняя ошибка аппроксимации, %	4,58	5,06

Согласно данным таблицы 13.4, уравнение регрессии, аппроксимирующее экспериментальные данные, признается адекватным, так как $F_{\text{расч}} > F_{\text{табл}}$, а ошибка аппроксимации удовлетворительной.

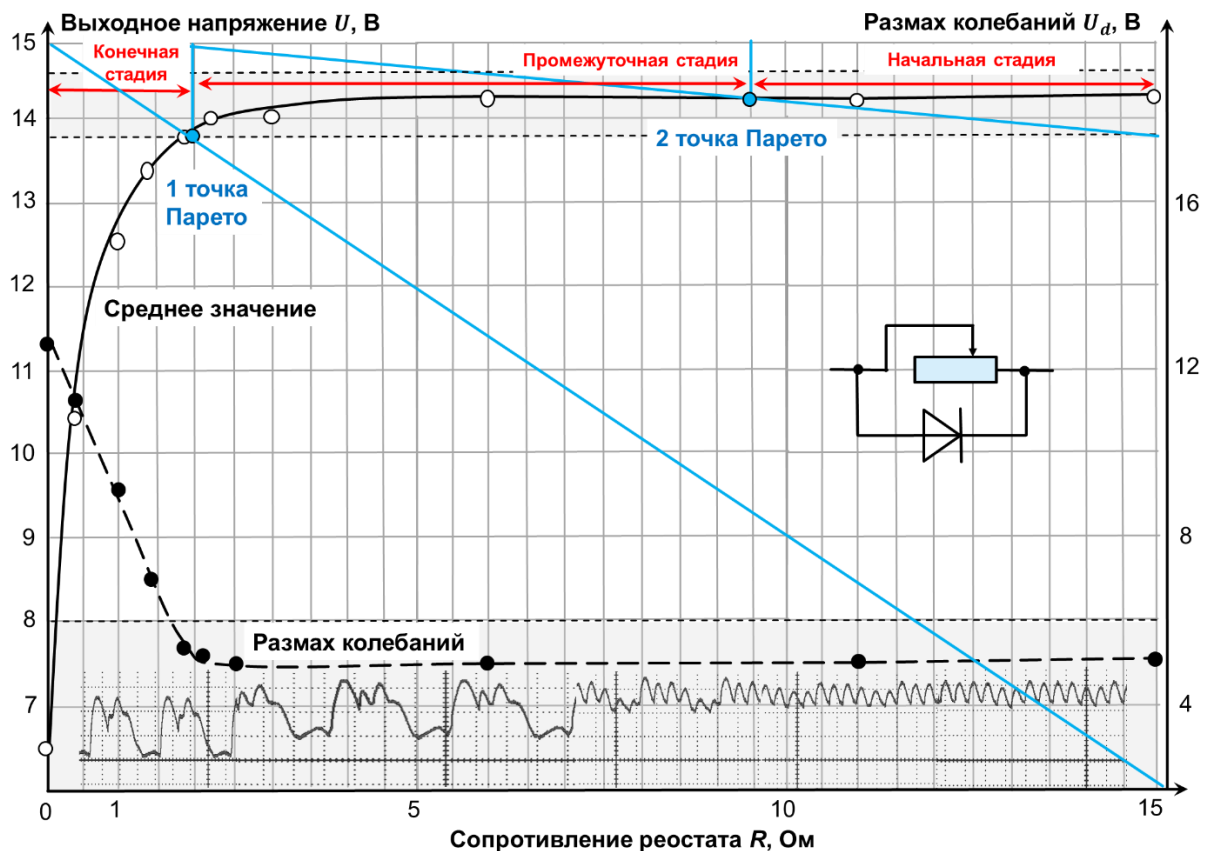


Рисунок 13.12 – Определение границ развития неисправности (на примере короткого замыкания диода)

§5 Обрыв фазы обмотки статора

Результаты физического моделирования обрыва фазы обмотки статора показаны на рисунке 13.13, из которого следует, что увеличение сопротивления цепи приводит к уменьшению выходного напряжения.

Увеличение сопротивления реостата сопровождается изменением величины и формы выходного напряжения. Достижение сопротивлением реостата величины $180 r_{OC}$, (r_{OC} – исходное сопротивление фазы обмотки статора) приводит к полному отключению данной фазы обмотки, генератор при этом продолжает работать, однако вырабатываемое им напряжение имеет настолько низкое значение, что потребители переходят на питание от аккумуляторной батареи.

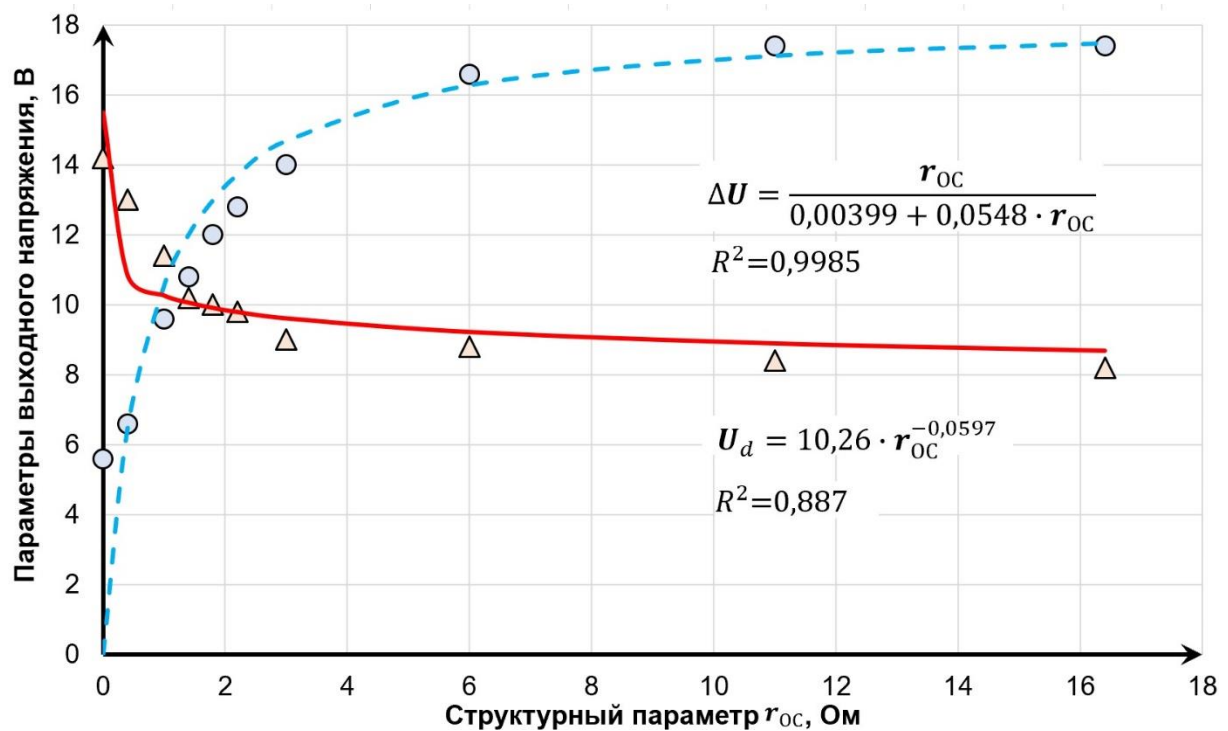


Рисунок 13.13 – Изменение диагностических параметров при изменении структурного параметра (при моделировании обрыва фазы обмотки статора)

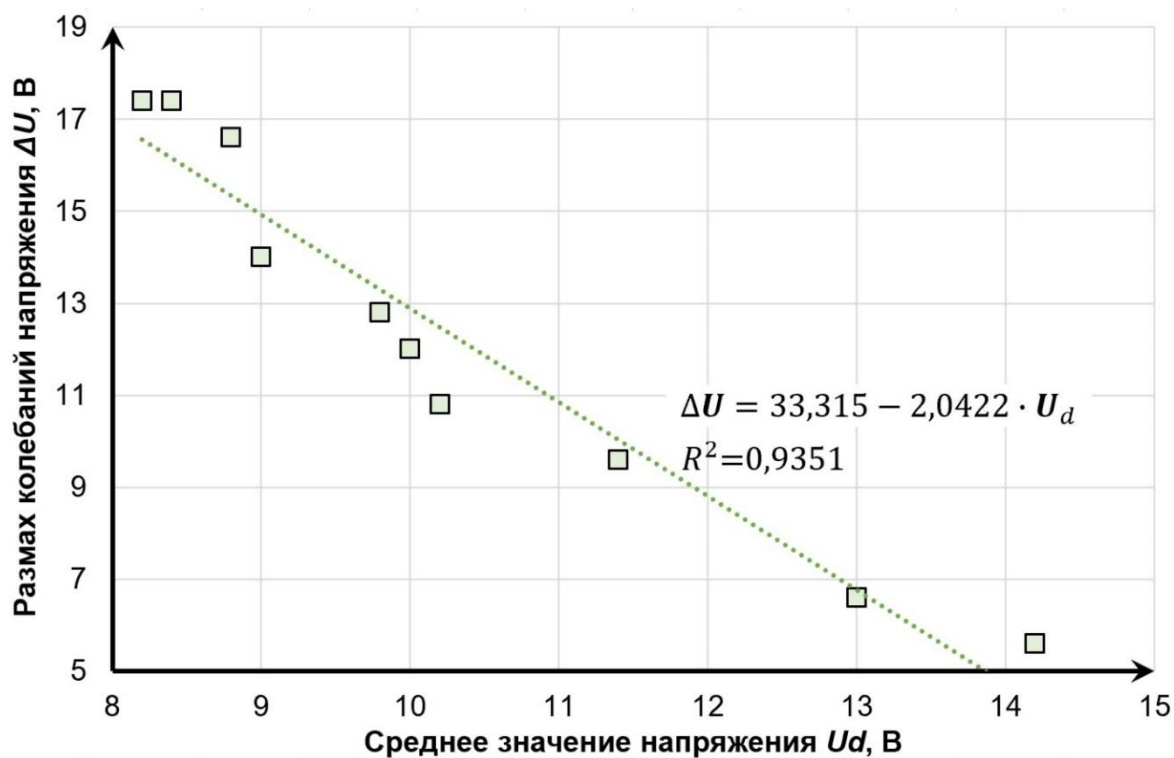


Рисунок 13.14 – Зависимость размаха колебаний от среднего значения напряжения (при обрыве фазы обмотки статора)

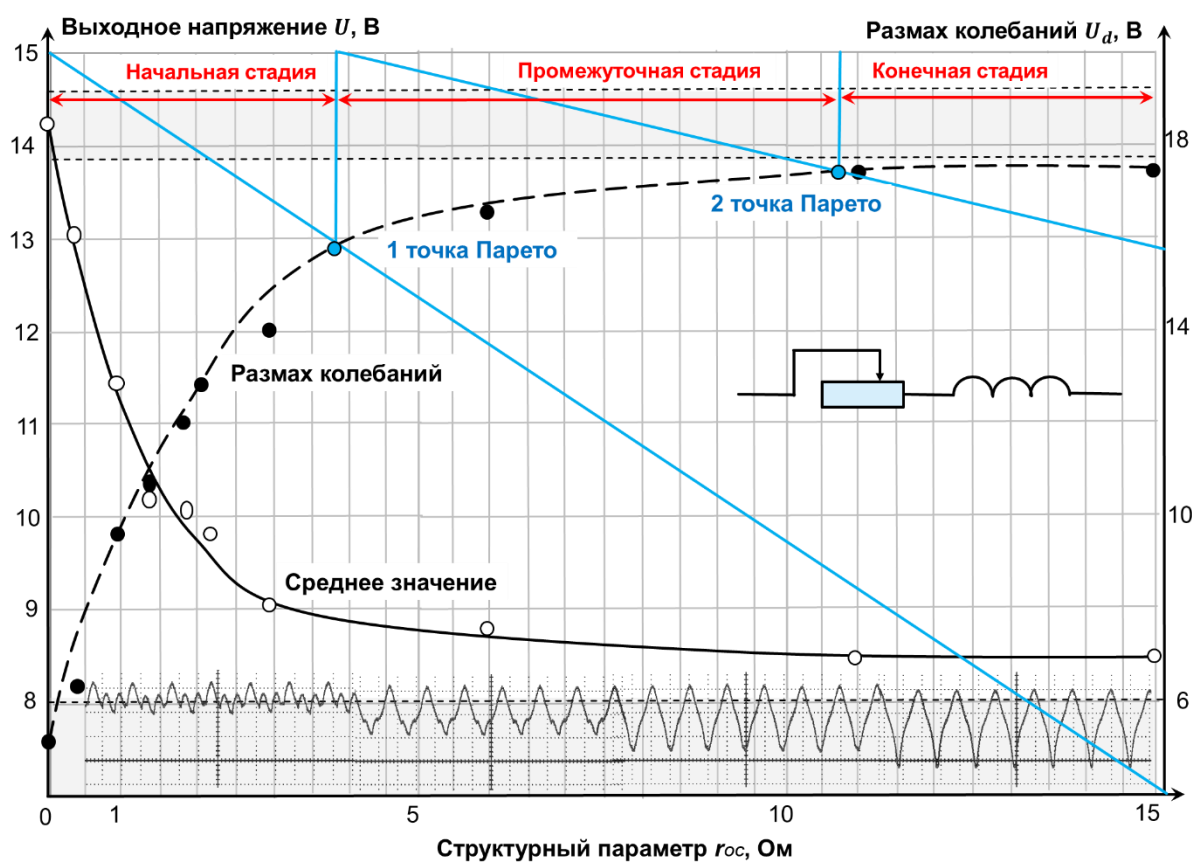


Рисунок 13.15 – Определение границ развития неисправности (на примере обрыва фазы обмотки статора)

§6 Межфазное замыкание обмотки статора

Результаты физического моделирования межфазного замыкания обмотки статора показаны на рисунке 13.16, из которого следует, что уменьшение величины сопротивления приводит к уменьшению среднего значения и росту размаха колебаний выходного напряжения.

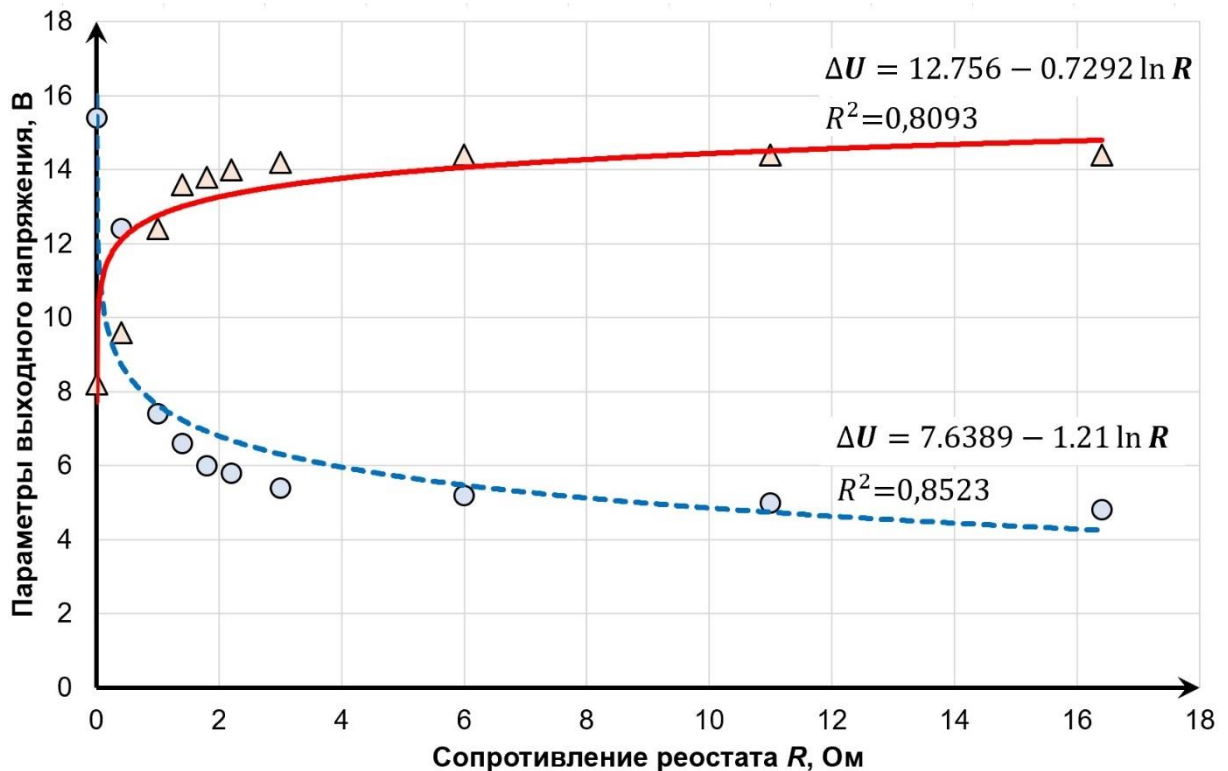


Рисунок 13.16 – Изменение диагностических параметров при изменении структурного параметра (при моделировании межфазного замыкания обмотки статора)

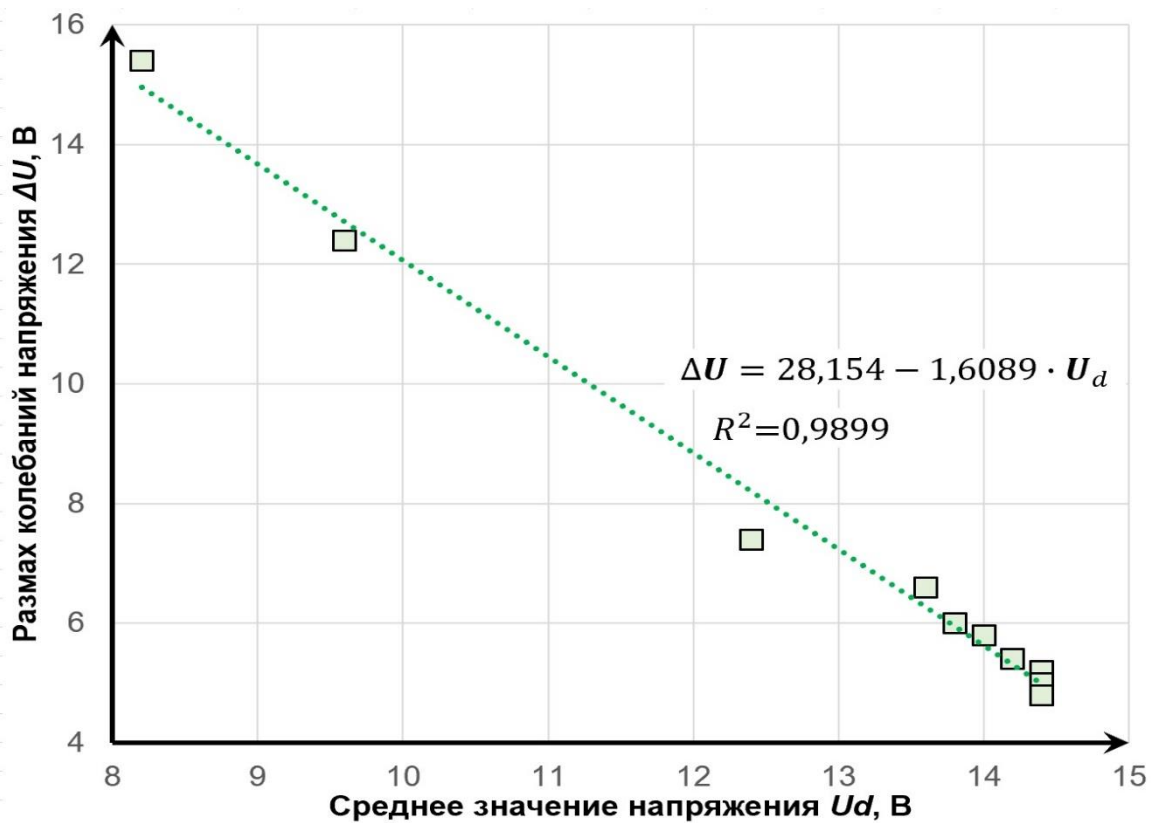


Рисунок 13.17 – Зависимость размаха колебаний от среднего значения напряжения (при межфазном замыкании обмотки статора)

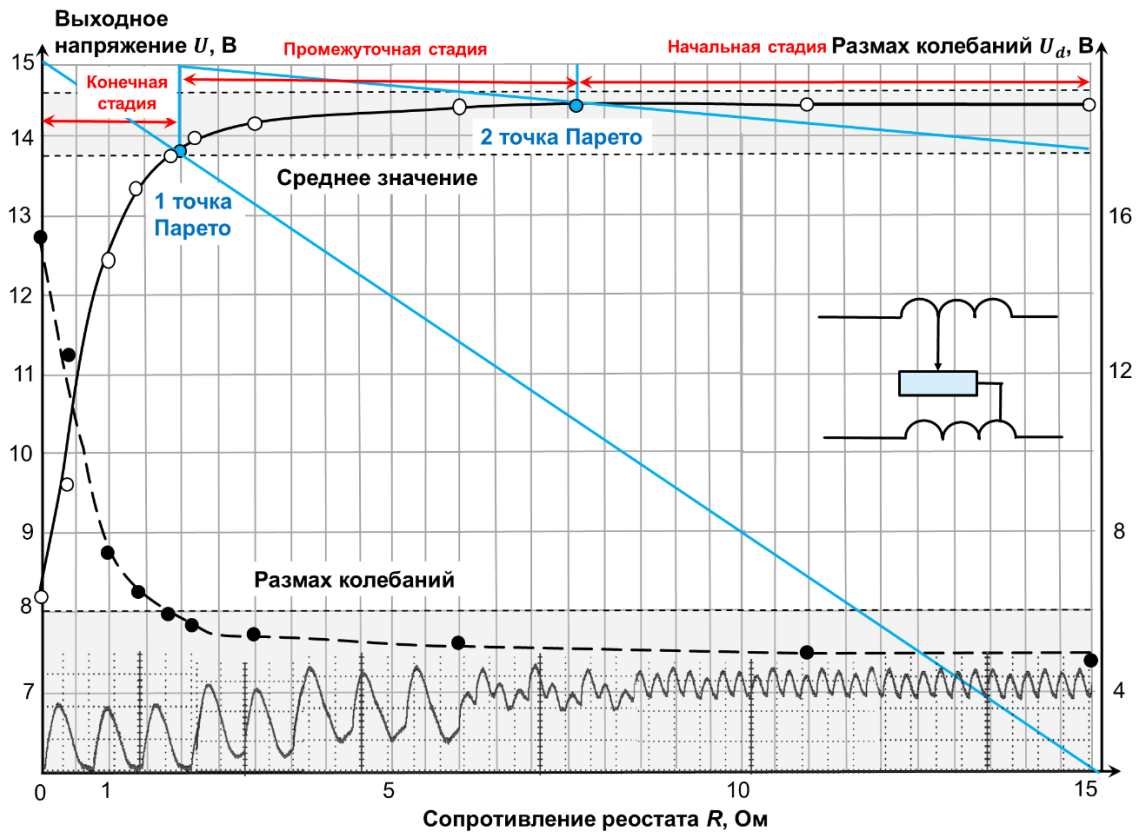


Рисунок 13.18 – Определение границ развития неисправности (на примере межфазного замыкания обмотки статора)

§7 Замыкание фазы обмотки статора на корпус

Результаты физического моделирования замыкания фазы обмотки статора на корпус показаны на рисунке 13.19, из которого следует, что уменьшение величины сопротивления приводит к уменьшению среднего значения и росту размаха колебаний выходного напряжения.

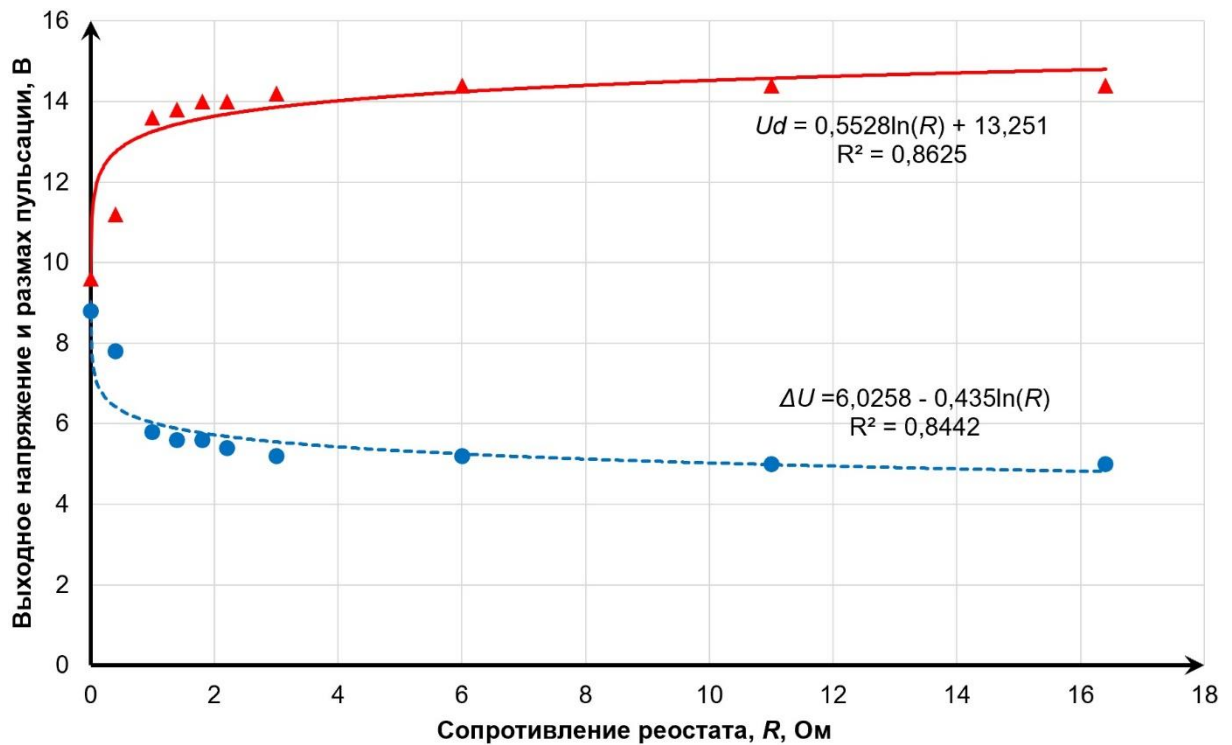


Рисунок 13.19 – Изменение диагностических параметров при изменении структурного параметра (при моделировании замыкания фазы обмотки статора на корпус)

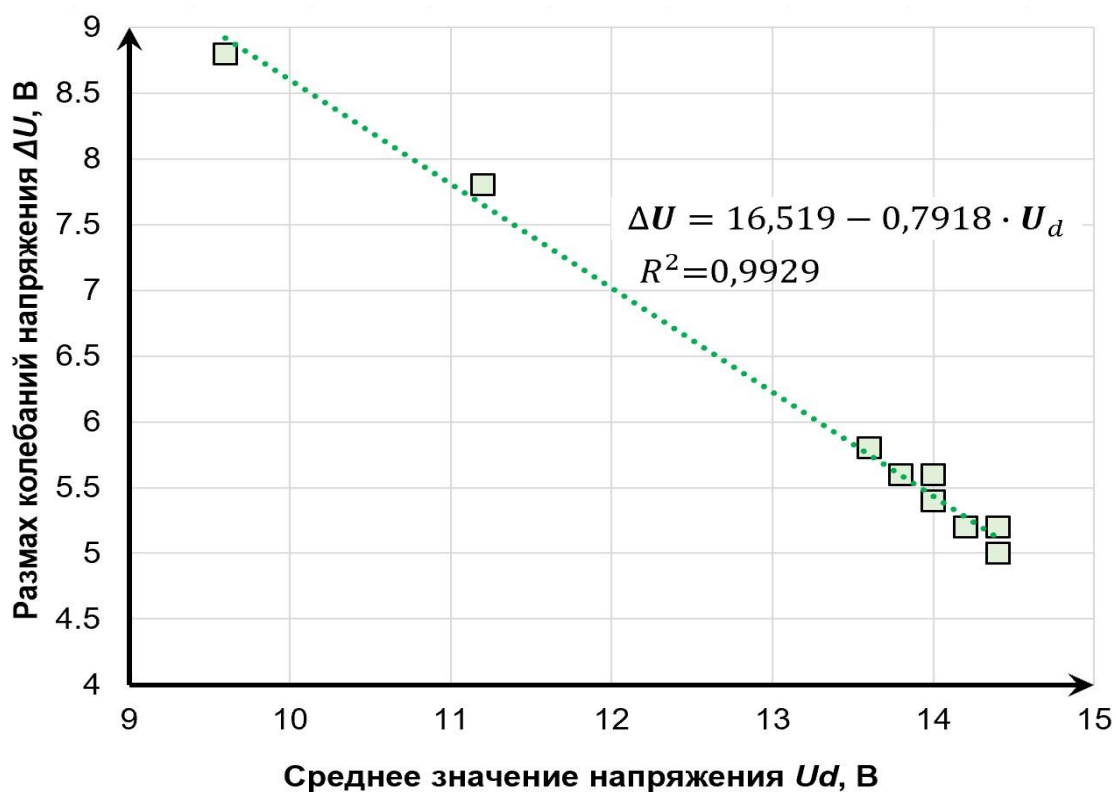


Рисунок 13.20 – Зависимость размаха колебаний от среднего значения напряжения (при замыкании фазы обмотки статора на корпус)

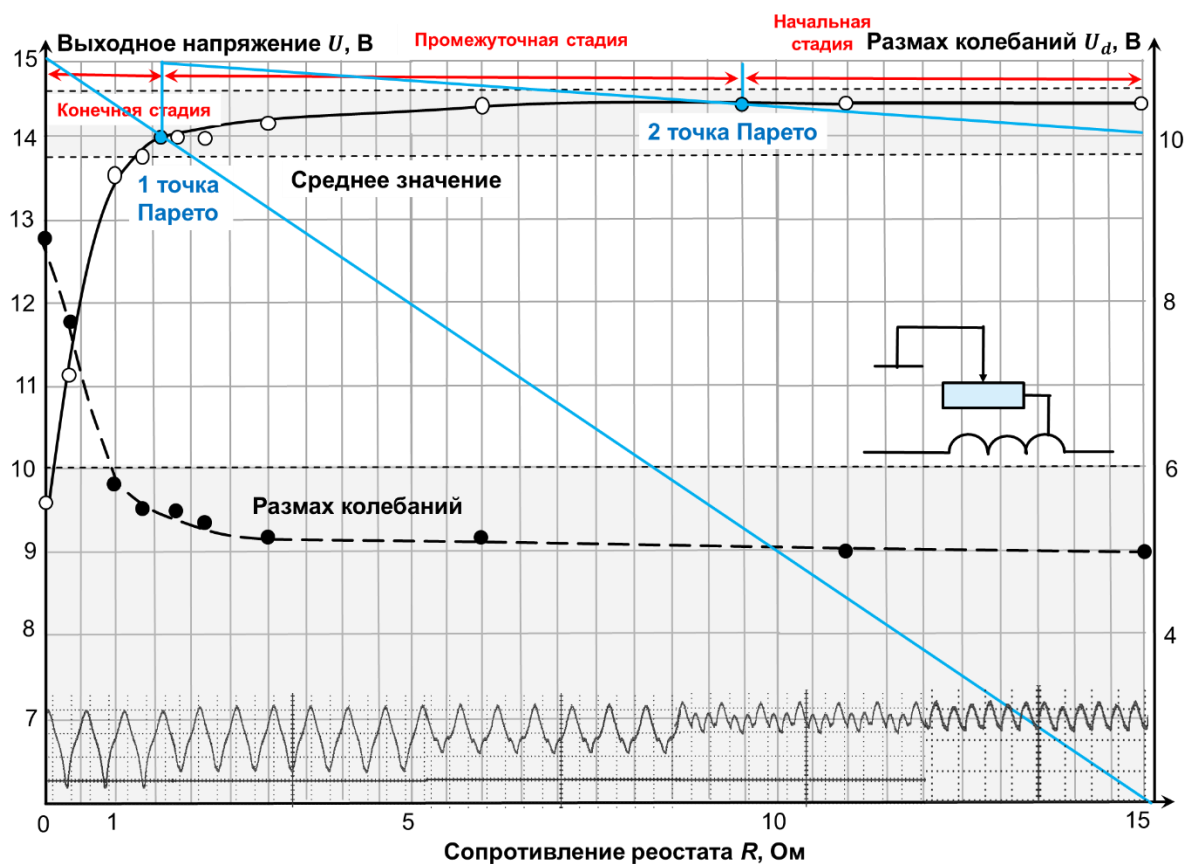
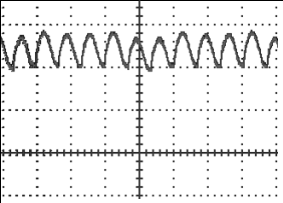
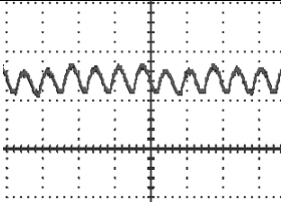
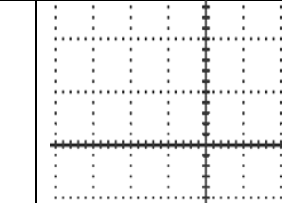
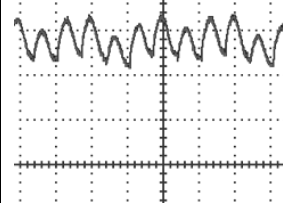
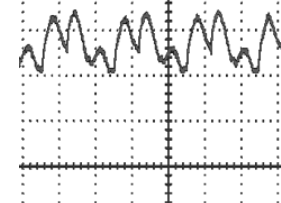
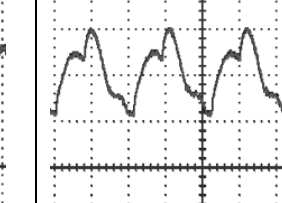


Рисунок 13.21 – Определение границ развития неисправности (на примере замыкания фазы обмотки статора на корпус)

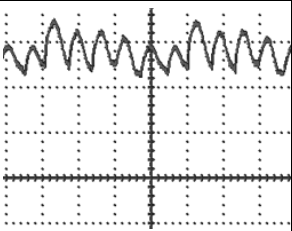
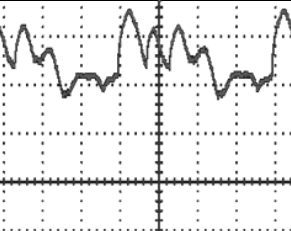
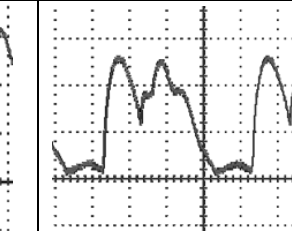
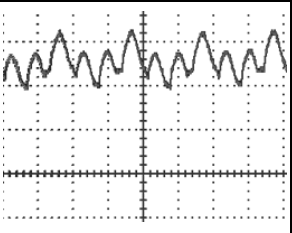
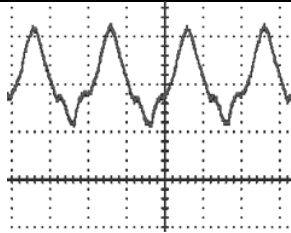
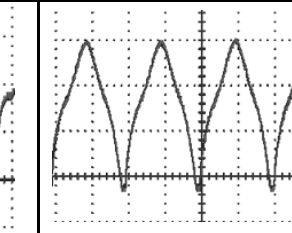
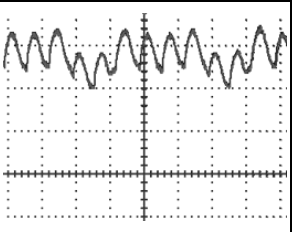
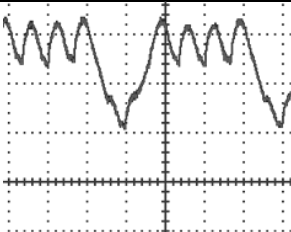
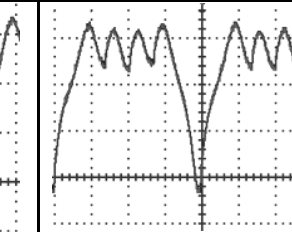
§8 Результаты определения границ возникновения и развития неисправностей генератора

Обработка полученных осциллограмм позволила получить точные границы возникновения и развития вышеперечисленных неисправностей в значениях диагностических и структурных параметров, приведённые в таблице 13.5.

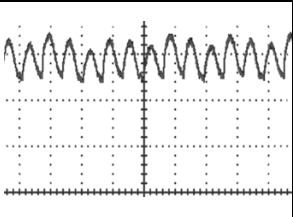
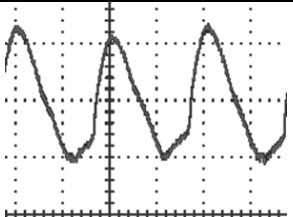
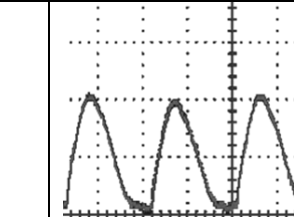
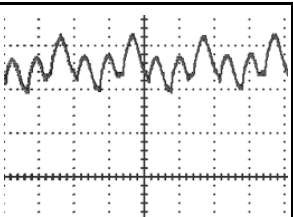
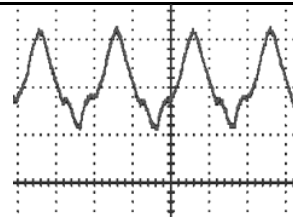
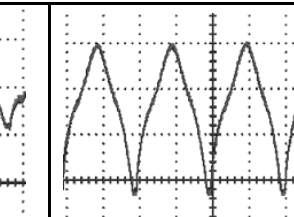
Таблица 13.5 – Границы возникновения и развития неисправностей автомобильных генераторов

Значения параметров	Наименование неисправности и стадия развития		
	Начальная стадия	Промежуточная стадия	Конечная стадия
1	2	3	4
Обрыв обмотки ротора			
Форма осциллограммы			
Среднее значение напряжения, В	13,2 – 14,4	11,2 – 13,2	< 11,2
Размах колебаний напряжения, В	5,0 – 5,5	4,5 – 5,5	< 4,5
Электрическое сопротивление, Ом	< 2,0	2,0 – 3,5	> 3,5
Межвитковое замыкание фазы обмотки статора			
Форма осциллограммы			
Среднее значение напряжения, В	14,4	14,4 – 13,8	13,8 – 10,2
Размах колебаний напряжения, В	6,0	6,0	6,0 – 10,2

Продолжение таблицы 13.5

1	2	3	4
Электрическое сопротивление, Ом	$> 10,0$	$10,0 - 1,9$	$< 1,9$
Короткое замыкание диода			
Форма осциллограммы			
Среднее значение напряжения, В	14,4	$14,4 - 13,8$	$13,8 - 6,5$
Размах колебаний напряжения, В	6,0	6,0	$6,0 - 11,2$
Электрическое сопротивление, Ом	$> 9,2$	$9,2 - 1,9$	$< 1,9$
Обрыв фазы обмотки статора			
Форма осциллограммы			
Среднее значение напряжения, В	$14,2 - 8,8$	$8,8 - 7,0$	7,0
Размах колебаний напряжения, В	$5,6 - 15,6$	$15,6 - 17,2$	17,2
Электрическое сопротивление, Ом	$< 3,6$	$3,6 - 10,5$	$> 11,0$
Обрыв цепи диода			
Форма осциллограммы			
Среднее значение напряжения, В	$14,2 - 11,8$	11,8	11,8

Продолжение таблицы 13.5

1	2	3	4
Размах колебаний напряжения, В	5,6 – 15,8	15,8 – 18,0	18,0 – 18,4
Электрическое сопротивление, Ом	< 4,2	4,2 – 8,9	> 8,9
Межфазное замыкание обмотки статора			
Форма осциллограммы			
Среднее значение напряжения, В	14,4	14,4 – 13,8	13,8 – 8,2
Размах колебаний напряжения, В	5,6	5,6 – 5,8	5,8 – 15,8
Электрическое сопротивление, Ом	> 7,8	2,0 – 7,8	< 2,0
Замыкание обмотки статора на корпус			
Форма осциллограммы			
Среднее значение напряжения, В	14,4	14,4 – 13,8	13,8 – 10,2
Размах колебаний напряжения, В	5,4	5,4	5,4 – 10,0
Электрическое сопротивление, Ом	> 10,2	2,0 – 10,2	< 2,0

Анализ полученных данных позволяет говорить о том, что, зная величину размаха колебаний выходного напряжения, возможно заранее диагностировать неисправность, которая в ближайшем будущем приведёт к выходу из строя генератора.

§9 Выводы по главе

Результаты физического моделирования позволили установить характер влияния неисправностей на работу генератора в процессе своего развития. Подтверждён линейный характер зависимости между средним значением U_d и размахом колебаний ΔU выходного напряжения.

Парето-анализ полученных зависимостей позволил установить границы возникновения и развития неисправностей в значениях структурных и диагностических параметров.

Глава 14 Анализ результатов экспресс-диагностирования генераторов

§1 Изменение диагностического параметра в процессе эксплуатации

Результаты диагностирования автомобильных генераторов предлагаемым методом, расположенные в порядке возрастания наработки приведены на рисунке 14.1. Установлено, что размах колебаний выходного напряжения работоспособных генераторов с увеличением наработки монотонно возрастает, не достигая, однако, предельных или допустимых значений. Размах колебаний генераторов с электрическими неисправностями значительно превышает допустимые значения, позволяя использовать этот параметр для определения технического состояния.

Разброс значений диагностического параметра генераторов с неисправностями объясняется различием в характере возникших неисправностей и стохастичностью процесса их развития.

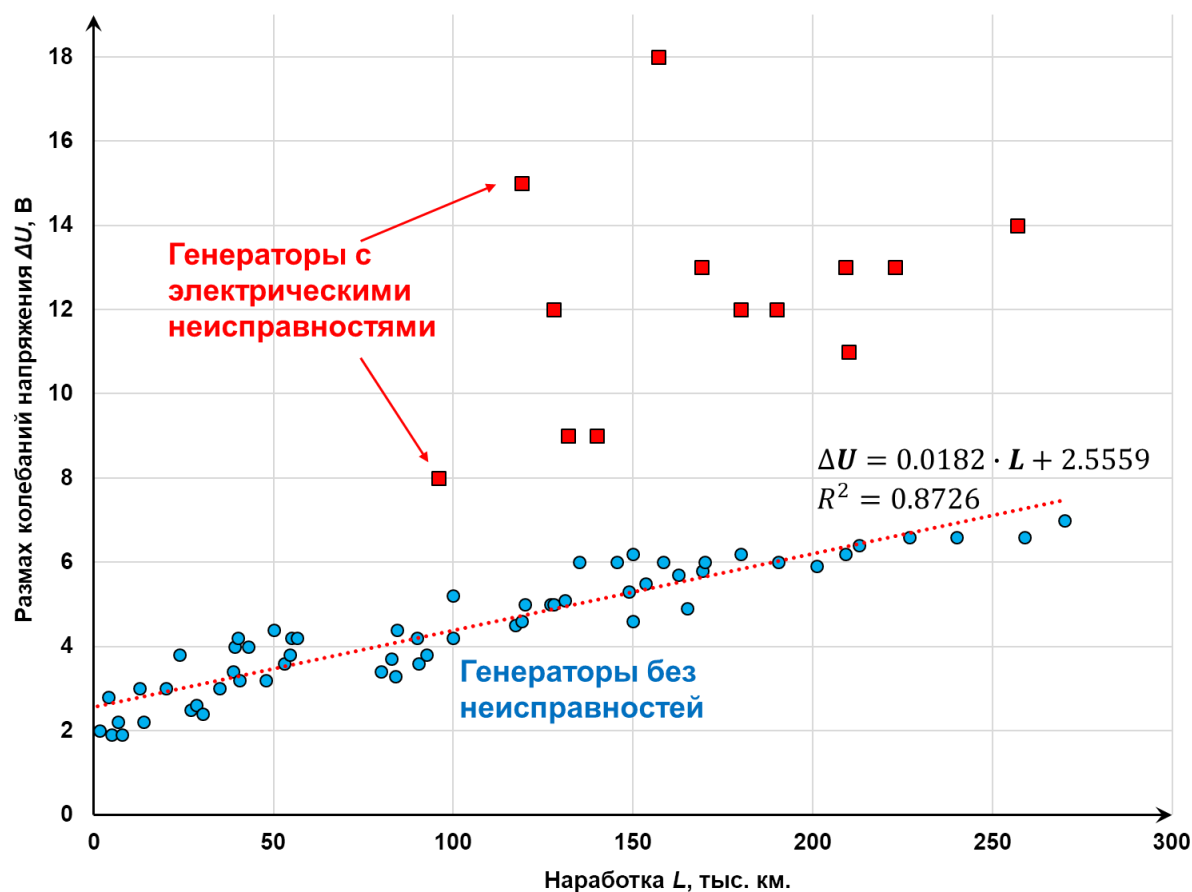


Рисунок 14.1 – Изменение размаха колебаний с увеличением наработки генераторов

В соответствии со структурой математической модели «Интенсивность изменения ресурса» автомобильных генераторов, исходя из выражения (8.12) была определена оптимальная температура $t_{\text{опт}}$, то есть такая, при которой интенсивность изменения ресурса имеет минимальное значение.

Для решения этой задачи, используя метод наименьших квадратов, получаем значения коэффициентов λ_2 , $-\lambda_1$, $-\lambda_3$, $-\delta_2$. Тогда, значение оптимальной температуры окружающего воздуха составит:

$$t_0 = \frac{-\lambda_1}{2 \cdot \lambda_3} = 4,67 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Для построения регрессионной модели и оценки коэффициентов корреляции выражение (2.47) линеаризовано путём замены переменных:

$$U_S = a_0 + a_1 \cdot X_1 + a_2 \cdot X_2 , \quad (14.1)$$

где $X_1 = (\bar{t}_i - t_0)^2 + \sigma_{ti}^2$; $X_2 = L$

В результате проведения регрессионного анализа были получены численные значения коэффициентов ранее полученной аналитическим путём математической модели:

$$\bar{U}_S = 0,062075 + 3,6 \cdot 10^{-6} [(\bar{t}_b - 4,67)^2 + \sigma_t^2] + 9,44 \cdot 10^{-5} \cdot L , \quad (14.2)$$

Полученное уравнение регрессии подвергли статистическому исследованию, которое включало статистическую оценку значимости коэффициентов регрессии и проверку полученного уравнения на адекватность. Значимость коэффициентов регрессии оценивалась с помощью критерия Стьюдента по методике, изложенной в работах [16, 38] и приведена в таблице 14.1.

$$t_{\text{ст}}^{\text{опыт}} = \frac{|\alpha_k|}{\sigma_{\text{ост}} \cdot \sqrt{C_{ii}}} \geq t_{\text{ст}}^{\text{табл}} \left(k = n - m - 1 \right) , \quad (14.3)$$

где $t_{\text{ст}}$ – коэффициент значимости;

$\sigma_{\text{ост}}$ – среднеквадратическое отклонение, получаемое извлечением квадратного корня из остаточной дисперсии ($\sigma_{\text{ост}}^2$);

C_{ii} – диагональные элементы обращенной информационной матрицы;

α – уровень значимости;

n – число наблюдений;

m – число значащих коэффициентов модели.

Информационная матрица X составляется из коэффициентов системы нормальных уравнений:

$$X = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix}. \quad (14.4)$$

Таблица 14.1 – Статистическая оценка коэффициентов регрессии

Наименование характеристики	Численное значение
Расчётное значение критерия Стьюдента (t) для коэффициентов (a_k)	
t_{a0}	13,8
t_{a1}	1,73
t_{a2}	5,72
Табличное значение критерия Стьюдента $t(0,10; 56)$	1,67

Анализ результатов таблицы 14.1 показывает, что расчётное значение критерия Стьюдента t для всех коэффициентов больше табличного при уровне значимости 0,10, то есть коэффициенты регрессионной модели значимы.

Для измерения тесноты связи между двумя рассматриваемыми переменными применяются парные коэффициенты корреляции:

$$r_{UST} = \frac{\overline{TU_s} - \bar{T} \cdot \bar{U_s}}{\sigma_{U_s} \cdot \sigma_T}; \quad r_{USL} = \frac{\overline{LU_s} - \bar{L} \cdot \bar{U_s}}{\sigma_{U_s} \cdot \sigma_L}; \quad r_{LT} = \frac{\overline{LT} - \bar{T} \cdot \bar{L}}{\sigma_L \cdot \sigma_T}. \quad (14.5)$$

Совокупный коэффициент множественной корреляции является показателем тесноты связи между результативным и двумя или более факторными признаками.

В случае линейной двухфакторной корреляции совокупный коэффициент множественной корреляции может быть вычислен по следующей формуле:

$$R_{US,T,L} = \sqrt{\frac{r_{US}^2 + r_{UL}^2 - 2 \cdot r_{US} \cdot r_{UL} \cdot r_{LT}}{1 - r_{LT}^2}} . \quad (14.6)$$

Совокупный коэффициент множественной детерминации показывает, какая доля вариации изучаемого показателя объясняется влиянием факторов, включённых в уравнение множественной регрессии.

Проверка полученной модели на адекватность производилась с помощью множественного коэффициента детерминации R_{yx} .

Частные коэффициенты эластичности показывают, на сколько % в среднем изменяется анализируемый показатель с изменением на 1% каждого фактора при фиксированном положении других факторов, и вычисляются по следующей формуле:

$$\beta_i = \alpha_j \cdot \frac{\bar{X}_j}{\bar{U}_S} . \quad (14.7)$$

где α_j – коэффициенты регрессии при j-том факторе;

$\bar{X}_j$ – среднее значение j-того фактора;

$\bar{U}_S$ – среднее значение зависимой переменной.

Для проверки значимости модели регрессии используется F-критерий Фишера.

Если расчётное значение с $k_1 = m$ и $k_2 = (n - m - 1)$ степенями свободы, где m – количество факторов, включённых в модель, больше табличного при заданном уровне значимости, то модель считается значимой.

$$F = \frac{R^2/m}{(1-R^2)/(n-m-1)} . \quad (14.8)$$

В таблице 14.2 приведены основные статистические характеристики регрессионной модели.

Согласно положениям математической статистики, если коэффициент множественной детерминации $R_{yx} \geq 0,75$ [16], то уравнение множественной регрессии считается работоспособным. Следовательно, регрессионная модель «интенсивности изменения ресурса» автомобильных генераторов является работоспособной (то есть адекватной), поскольку коэффициент множественной детерминации составляет 0,902.

Статистическая оценка значимости этого коэффициента производилась с помощью критерия Фишера. Опытное значение критерия Фишера больше, чем табличное для уровня значимости 0,10, что свидетельствует об адекватности модели исследуемому процессу.

Таблица 14.2 – Статистические характеристики регрессионной модели, оценивающие влияние температурного режима окружающего воздуха и наработки на величину интенсивности изменения ресурса автомобильных генераторов

Наименование характеристики	Численное значение
Коэффициент множественной корреляции	0,949
Коэффициент множественной детерминации	0,902
Опытное значение критерия Фишера	171,8
Табличное значение критерия Фишера F 0,10	2,18
Коэффициент влияния факторов	
β_T	0,20
β_L	0,75

§2 Зависимость ресурса работы генератора от значений факторов эксплуатации

Кроме того, коэффициент множественной детерминации $R_{yx}[T, L] = 0,902$ указывает на то, что температурный режим окружающего воздуха и наработка в значительной степени влияют на изменение ресурса

автомобильных генераторов и только 9,8% зависят от других неучтённых факторов.

Исходя из численных значений коэффициентов влияния, следует, что наибольшее влияние на интенсивность изменения ресурса автомобильных генераторов оказывает наработка ($\beta_L = 0,75$).

Исходя из выражения (14.2) на рисунках 14.2 и 14.3 показано влияние каждой переменной $L, \bar{t}_B$ на интенсивность изменения ресурса при фиксированных значениях других переменных.

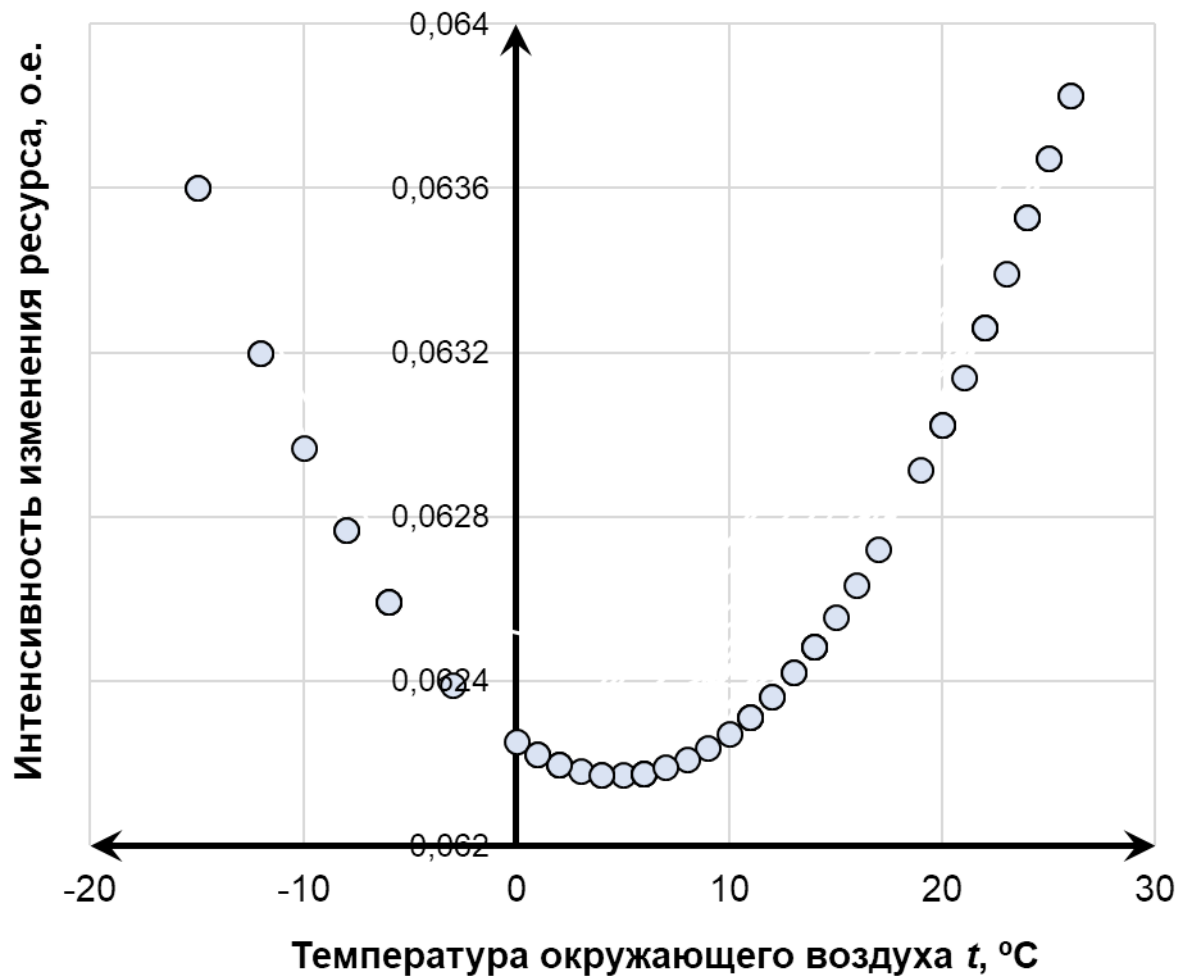


Рисунок 14.2 – Зависимость интенсивности изменения ресурса генератора от температуры окружающего воздуха

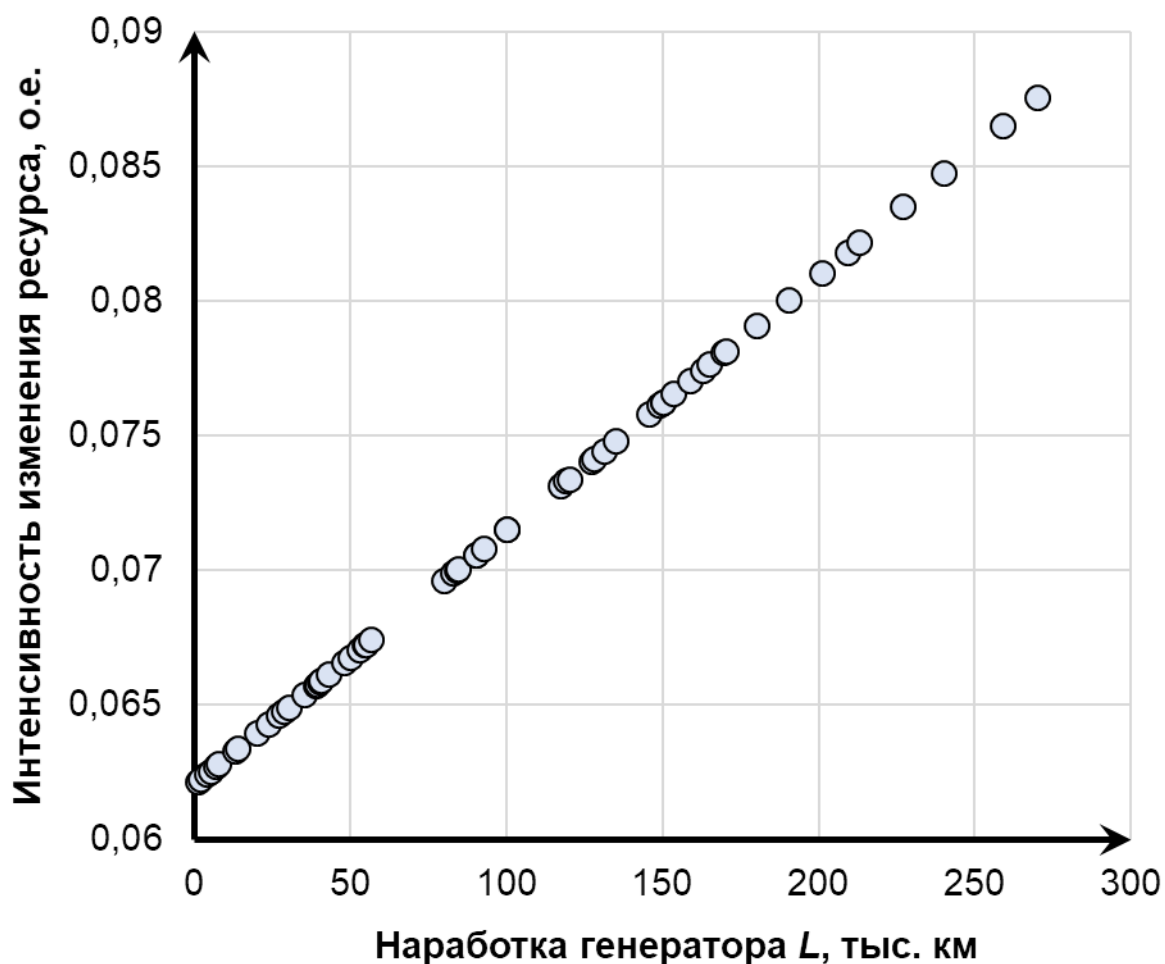


Рисунок 14.3 – Зависимость интенсивности изменения ресурса генератора от наработки

Из рисунков 14.2 и 14.3 следует, что с увеличением наработки интенсивность изменения ресурса увеличивается, то есть при прогнозировании остаточного ресурса по выражению (8.20) с увеличением периода упреждения уменьшается и величина R_5 . Отклонение температурного режима окружающего воздуха от оптимального также ведет к увеличению интенсивности изменения ресурса автомобильных генераторов.

В окончательном виде, исходя из выражений (8.20) и (14.2), выражение для определения остаточного ресурса автомобильных генераторов имеет следующий вид:

$$R_s = \frac{0,062075}{0,062075 + 3,6 \cdot 10^{-6} [(\bar{E}_B - 4,67)^2 + \sigma_E^2] + 9,44 \cdot 10^{-5} \cdot L} \quad (14.9)$$

На рисунке 14.4 приведено графическое представление изменения остаточного ресурса автомобильных генераторов в процессе эксплуатации.

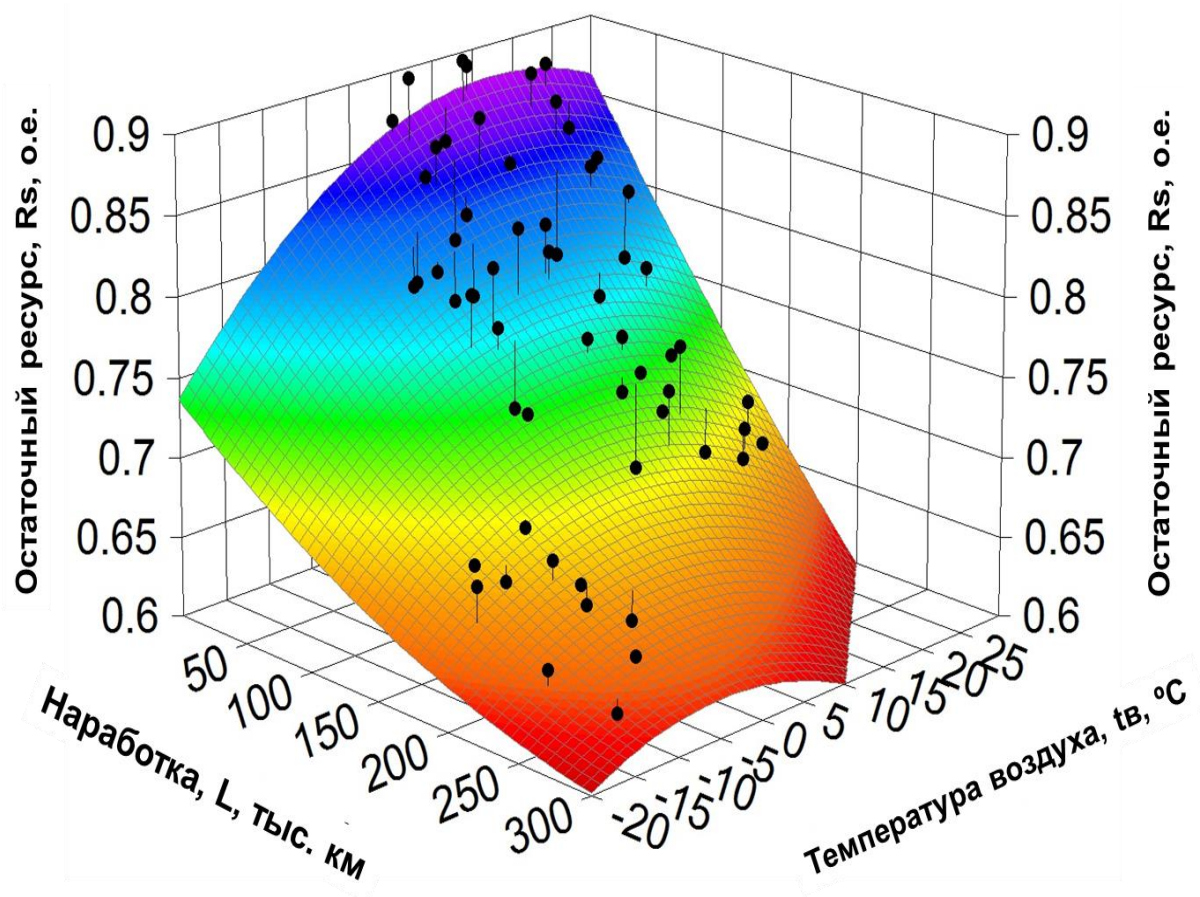


Рисунок 14.4 – Влияние наработки и температуры окружающего воздуха на остаточный ресурс автомобильных генераторов

Анализируя вид поверхности отклика, можно сделать вывод, что температура окружающей среды оказывает наибольшее влияние на интенсивность изменения ресурса в зоне небольшой наработки. По мере увеличения наработки генератора влияние температуры становится незначительным относительно длительности эксплуатации.

§3 Выводы по главе

В результате проведения регрессионного анализа были получены численные значения коэффициентов математической модели остаточного ресурса автомобильных генераторов. Численное значение коэффициента множественной детерминации составило 0,906, что указывает на достаточную полноту учёта факторов в модели.

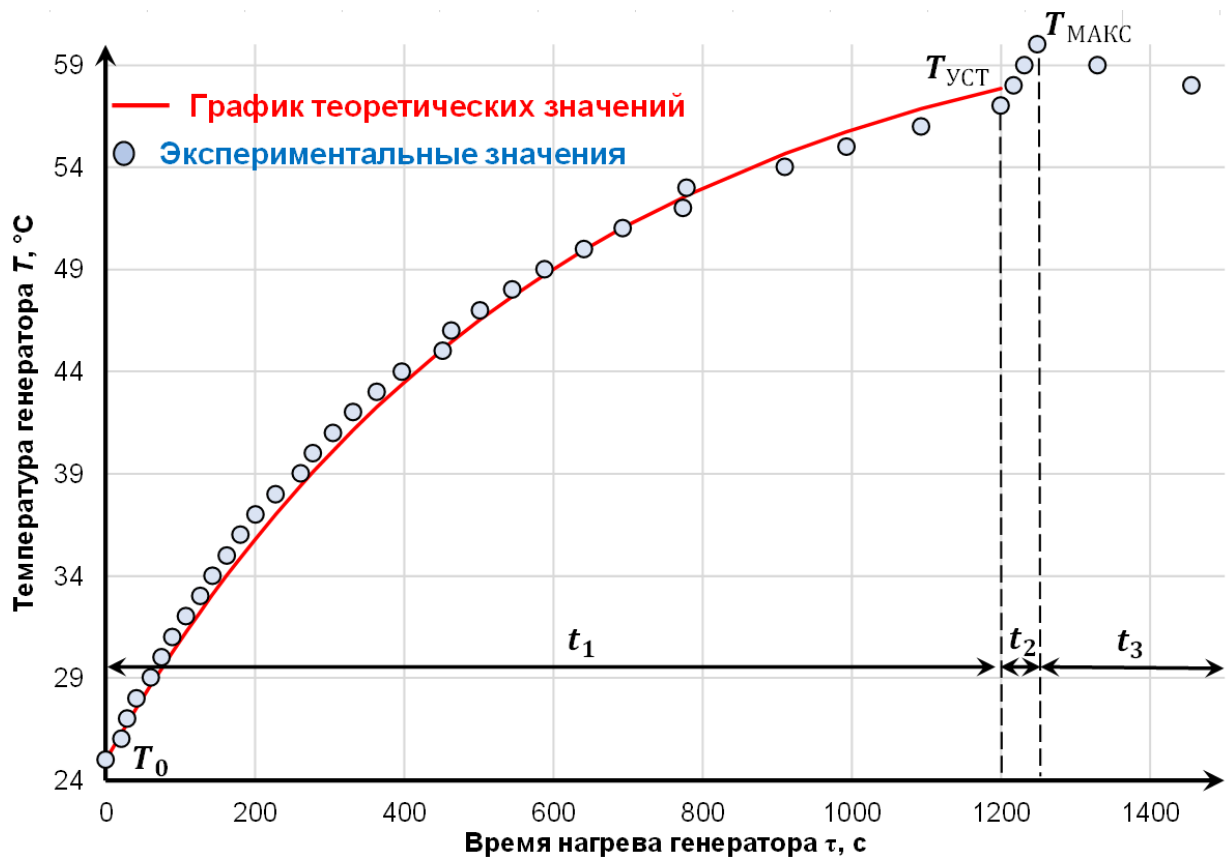
Температура окружающей среды оказывает наибольшее влияние на интенсивность изменения ресурса в зоне небольшой наработки. По мере увеличения наработки генератора влияние температуры становится незначительным относительно длительности эксплуатации.

Глава 15 Анализ результатов определения теплового состояния автомобильных генераторов

§1 Анализ результатов определения теплового состояния генератора в лабораторных условиях

Характеристическая кривая нагрева генератора показана на рисунке 15.1.

Кривая содержит следующие участки: регулярный тепловой режим, при котором наблюдается обычный рост температуры; аккумуляция тепла, при которой наблюдается резкий подъем температуры; естественное охлаждение. Первые два участка характеризуются различным темпом нагрева, поскольку на первом участке генератор работает в режиме самовентиляции, а на втором внутренний вентилятор не работает.



t_1 – период нагрева до установившегося теплового режима; t_2 – период повышения температуры после остановки генератора; t_3 – период охлаждения; T_0 – начальная температура поверхности; $T_{уст}$ – установившаяся температура; $T_{макс}$ – максимальная температура генератора

Рисунок 15.1 – Характеристическая кривая нагрева генератора

Нагрев генератора описывается экспоненциальной зависимостью

$$T = T_0 \cdot \left(1 + \alpha \cdot (1 - e^{-\tau/t})\right) \quad (15.1)$$

где T – текущее значение температуры, °C;

T_0 – начальное значение температуры, °C;

α – коэффициент, зависящий от работоспособности генератора;

τ – время, прошедшее с начала работы генератора, с;

t – общее время работы генератора, с.

Зависимость температуры генератора при различных сочетаниях мощности и частоты вращения ротора представлена на рисунке 15.2.

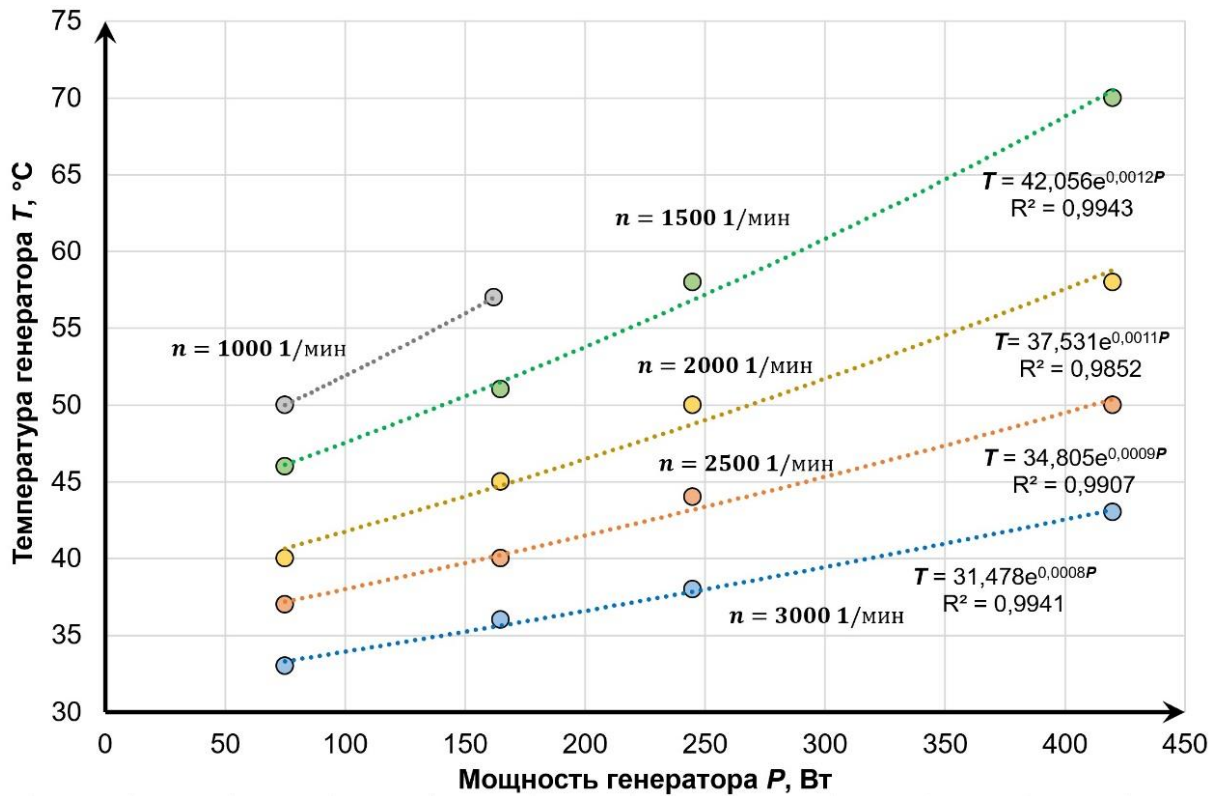


Рисунок 15.2 – Зависимость температуры генератора при различных сочетаниях мощности и частоты вращения ротора

Построение двухфакторной зависимости температуры генератора от частоты вращения и мощности потребителей в виде трёхмерной диаграммы, представлено на рисунке 15.3.

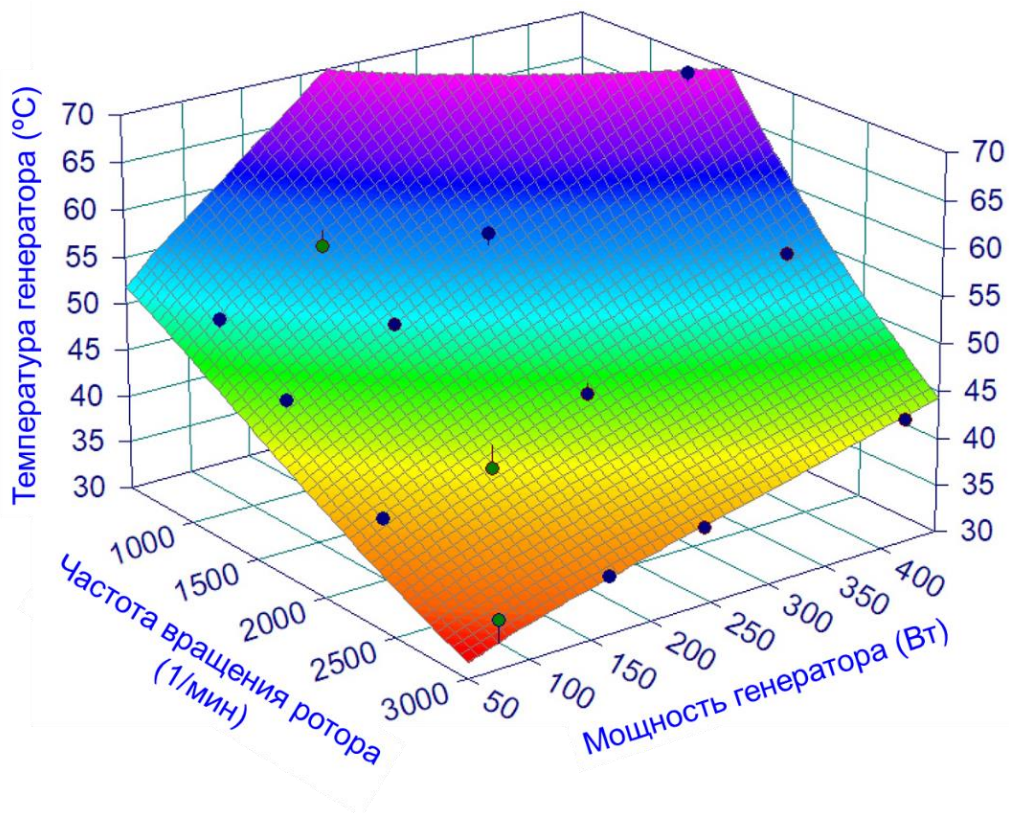


Рисунок 15.3 – Двухфакторная зависимость температуры генератора

Для нахождения промежуточных значений необходимо описать экспериментальные точки аналитическим выражением. Данная процедура выполнялась в программе TableCurve 3D v4.0

$$Z^{-1}=A+BX^{0.5}+CY, \quad (15.2)$$

где: $A=0,01967$; $B= - 0.00066$; $C=5,5 \cdot 10^{-6}$ – коэффициенты пропорциональности;

$Z^{-1}=T$ – температура генератора, °C;

$X=n$ – частота вращения ротора генератора, мин⁻¹;

$Y=P$ – мощность потребителей, Вт.

Результаты оценки теплового состояния, полученные при физическом моделировании электрических неисправностей представлены на рисунке 15.4.

Из приведённых на рисунке 15.4 зависимостей следует, что наличие неисправностей способствует росту температуры генератора, причём величина превышения температуры определяется характером неисправности. Наибольший зафиксированный перегрев соответствует межвитковому замыканию фазы статора, а наименьший – обрыву диода выпрямителя.

Это согласуется с критичностью данных дефектов, поскольку при обрыве диода генератор продолжает работать, однако вырабатываемое им напряжение значительно уменьшается, что приведёт к недозаряду аккумуляторной батареи автомобиля. Межвитковое замыкание фазы статора сопровождается характерным гулом, выходное напряжение генератора имеет настолько низкое значение, что потребители переходят на питание от аккумуляторной батареи.

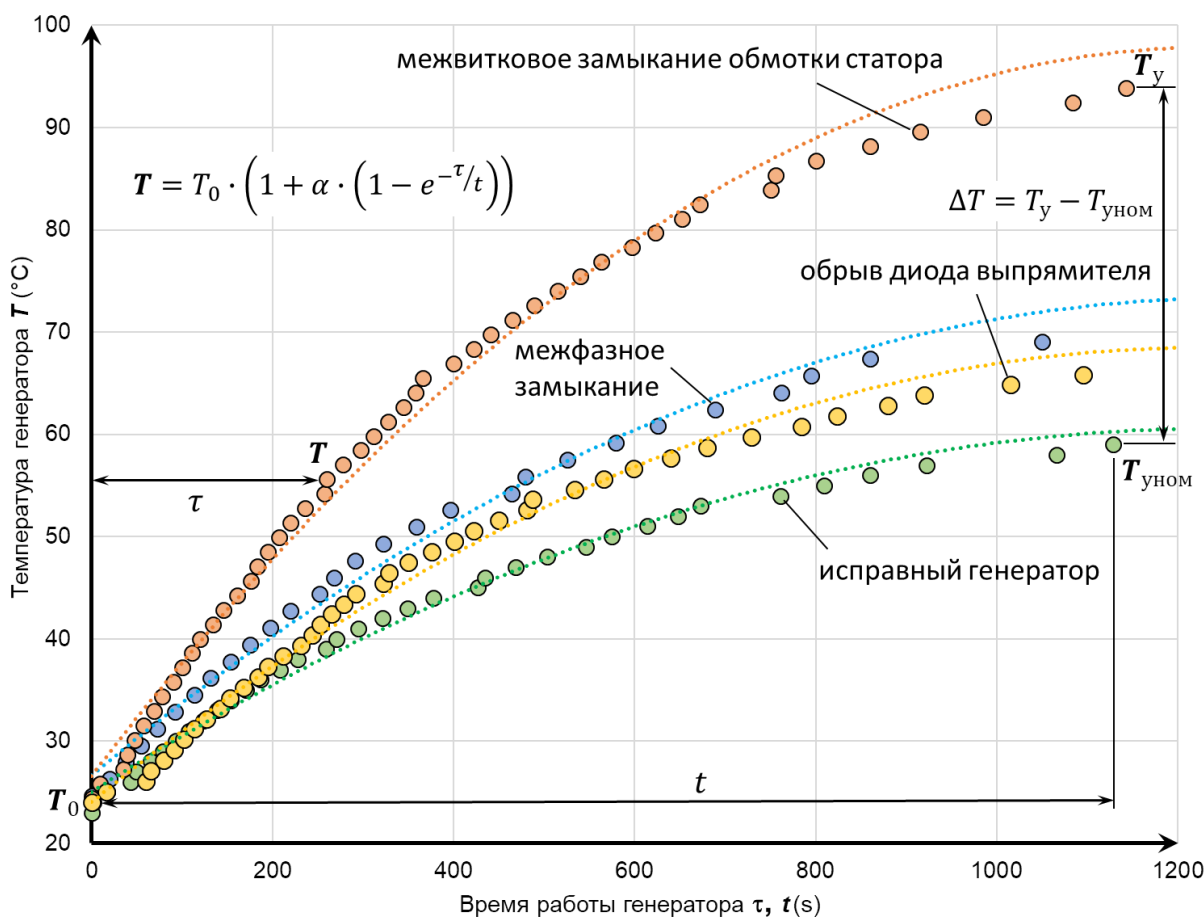


Рисунок 15.4 – Зависимость температуры генератора от его технического состояния

§2 Анализ результатов определения теплового состояния генератора в производственных условиях

Обработка данных таблицы 12.4 представлена на рисунке 15.5. Из него следует, что температура генератора увеличивается при замедлении и остановке автомобиля, и снижается при повышении скорости движения. Причём, движение в городском цикле значительно увеличивает время выхода генератора на стационарный тепловой режим, что обусловлено частыми остановками и замедлениями автомобиля. Во время остановки снижается эффективность самовентиляции генератора (см. главу 2), происходит выделение тепла в подкапотное пространство от остановленного ДВС, ухудшается продувка подкапотного пространства набегающим потоком воздуха. Ускорение автомобиля, наоборот, способствует снижению температуры генератора.

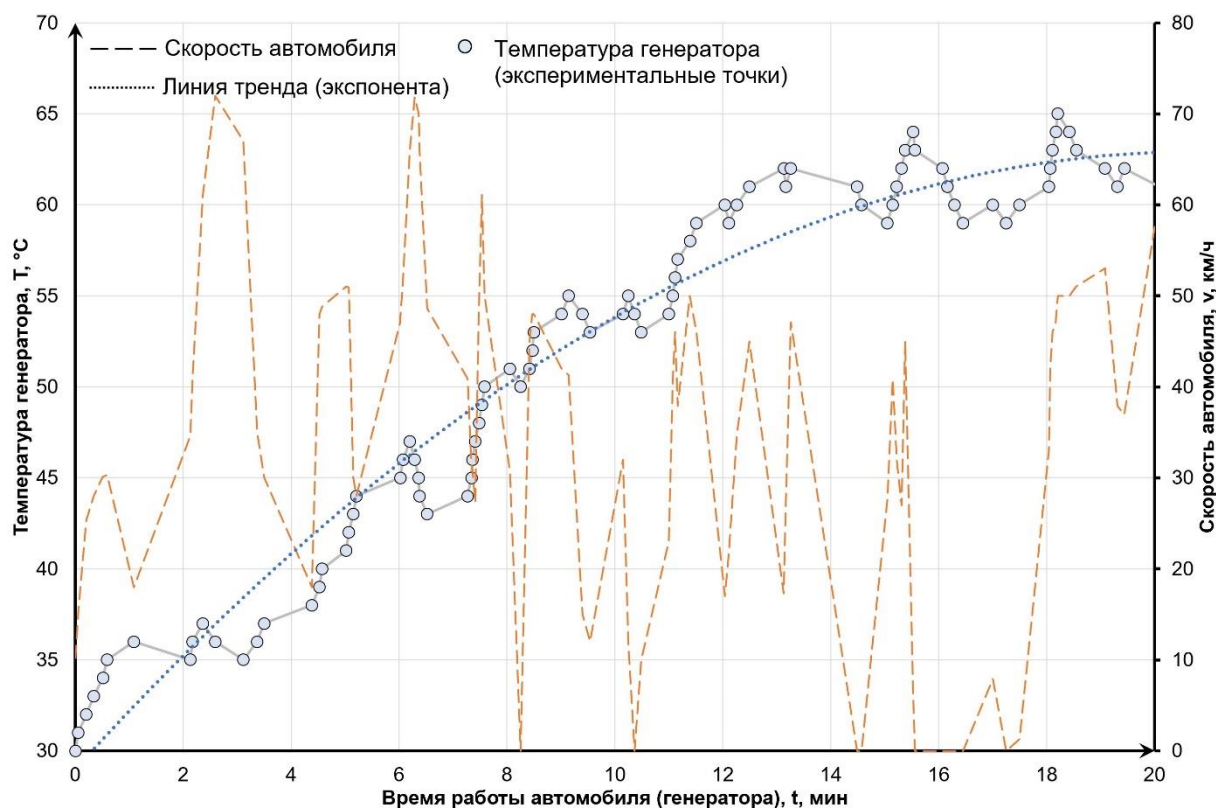


Рисунок 15.5 – Изменение теплового состояния автомобильного генератора при производственных испытаниях ($t_B, I_{\text{потр}} = \text{const}$)

Можно сделать вывод, что движение в городских условиях способствует увеличению температуры автомобильных генераторов относительно движения в стационарном режиме на 20-25%.

Результаты изменения теплового состояния генератора при различной температуре окружающего воздуха, изменении тока потребителей, скорости движения автомобиля и частоты вращения ДВС (ротора) приведены на рисунках 15.6 – 15.9.

При анализе результатов экспериментальных исследований были получены и обработаны данные о влиянии выбранных факторов на тепловое состояние генератора, а также, составлены диаграммы, отображающие зависимости изменения температуры. По полученным на графиках точкам, были составлены математические модели.

На рисунке 15.6 представлен график изменения температуры генератора в зависимости от температуры окружающей среды.

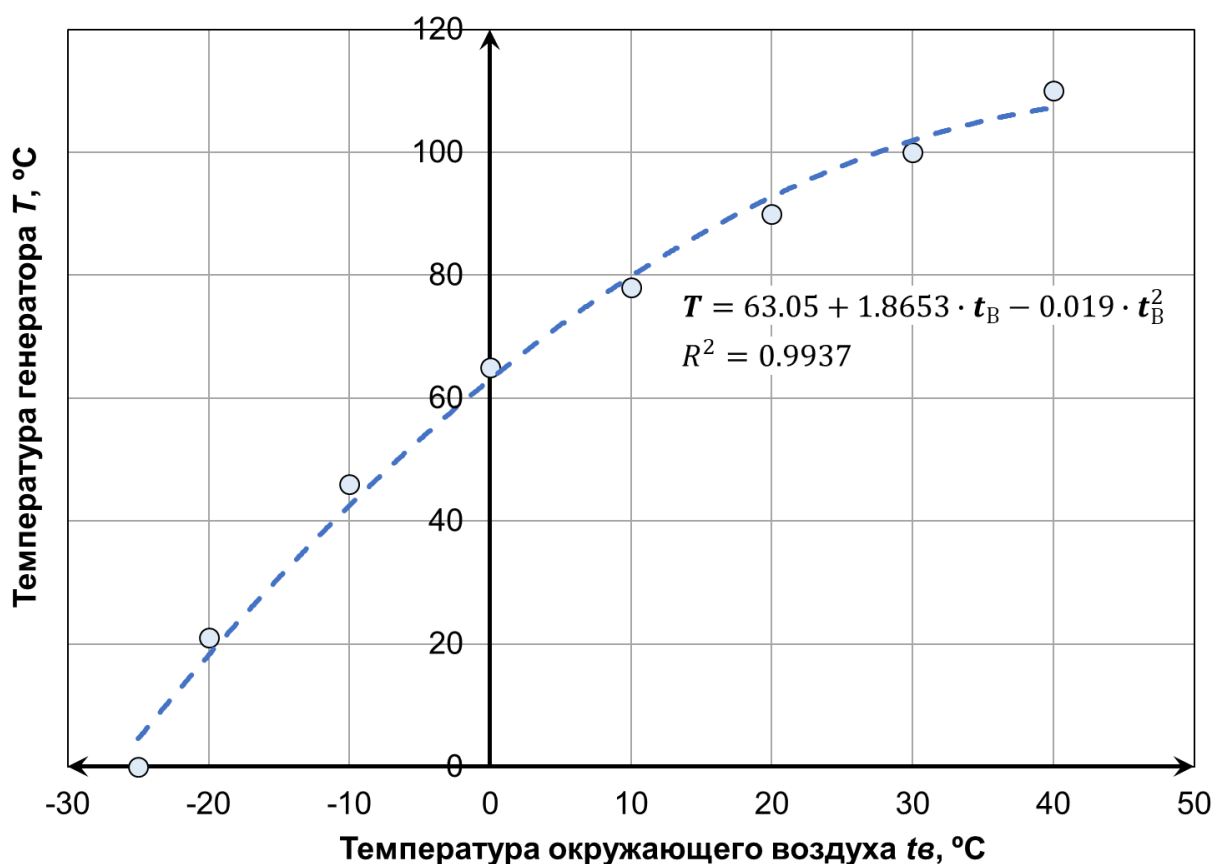


Рисунок 15.6 – Зависимость температуры генератора от температуры окружающей среды

По экспериментальным точкам была составлена регрессионная модель, которая имеет вид:

$$T = 63,05 + 1,8653 \cdot t_{\text{в}} - 0,019 \cdot t_{\text{в}}^2 \quad (15.3)$$

где $t_{\text{в}}$ – температура окружающего воздуха, °C.

На рисунке 15.7 представлен график зависимости температуры генератора от тока потребителей.

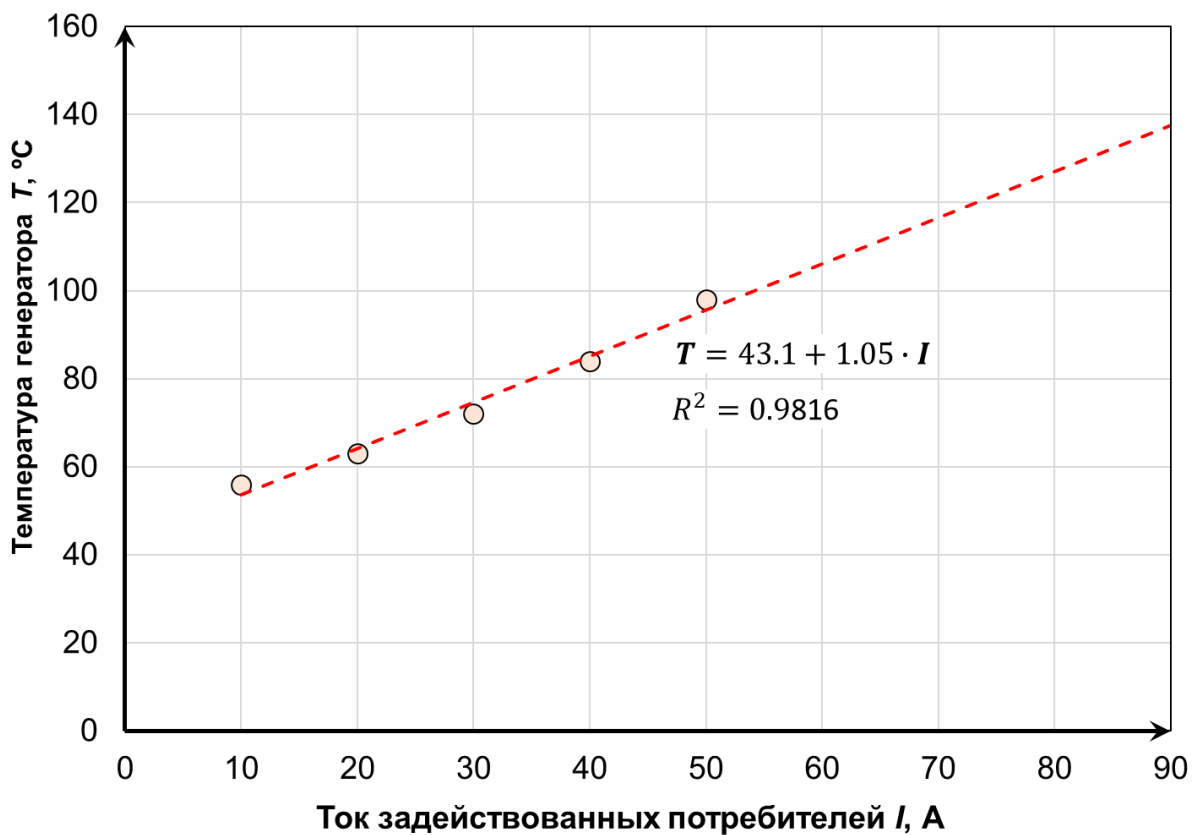


Рисунок 15.7 – Зависимость температуры генератора от тока потребителей

По экспериментальным точкам была составлена регрессионная модель, которая имеет вид:

$$T = 43,01 + 1,05 \cdot I_{\text{потр}} \quad (15.4)$$

где $I_{\text{потр}}$ – ток задействованных потребителей, А.

Следует заметить, что максимальное значение потребляемого тока в процессе эксперимента не превысило 50 А (соответствует 56% номинальной мощности генератора), однако при установке дополнительного оборудования возможно большее значение.

На рисунке 15.8 представлена зависимость изменения температуры генератора от скорости движения автомобиля.

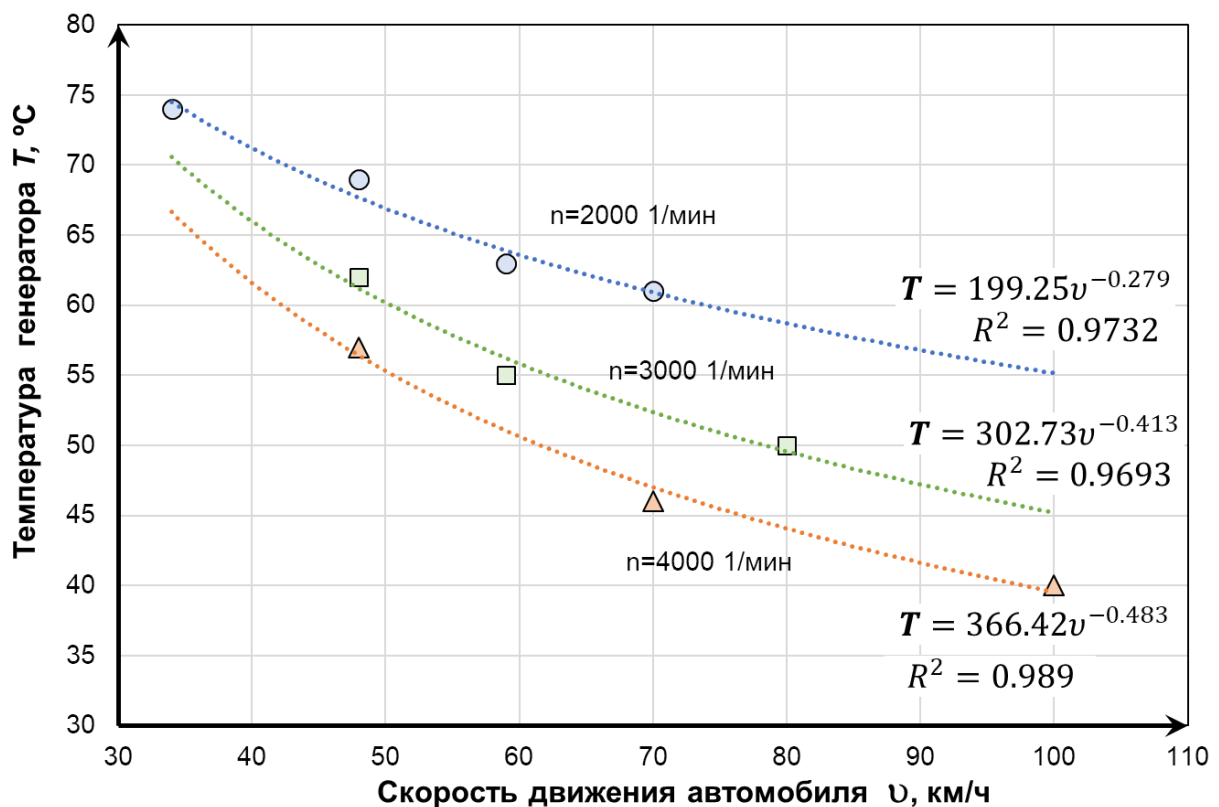


Рисунок 15.8 – Зависимость температуры генератора от скорости движения автомобиля

На рисунке 15.9 представлен график изменения температуры генератора от частоты вращения ротора генератора.

По экспериментальным точкам была составлена регрессионная модель зависимости температуры генератора от скорости движения автомобиля и частоты вращения ротора генератора. Она имеет вид:

$$T = \xi \cdot v_a^{-\zeta} \quad (15.5)$$

где v_a – скорость движения автомобиля, км/ч;

ξ, ζ – параметры чувствительности температуры к изменению скорости движения и частоты вращения коленчатого вала (ротора генератора).

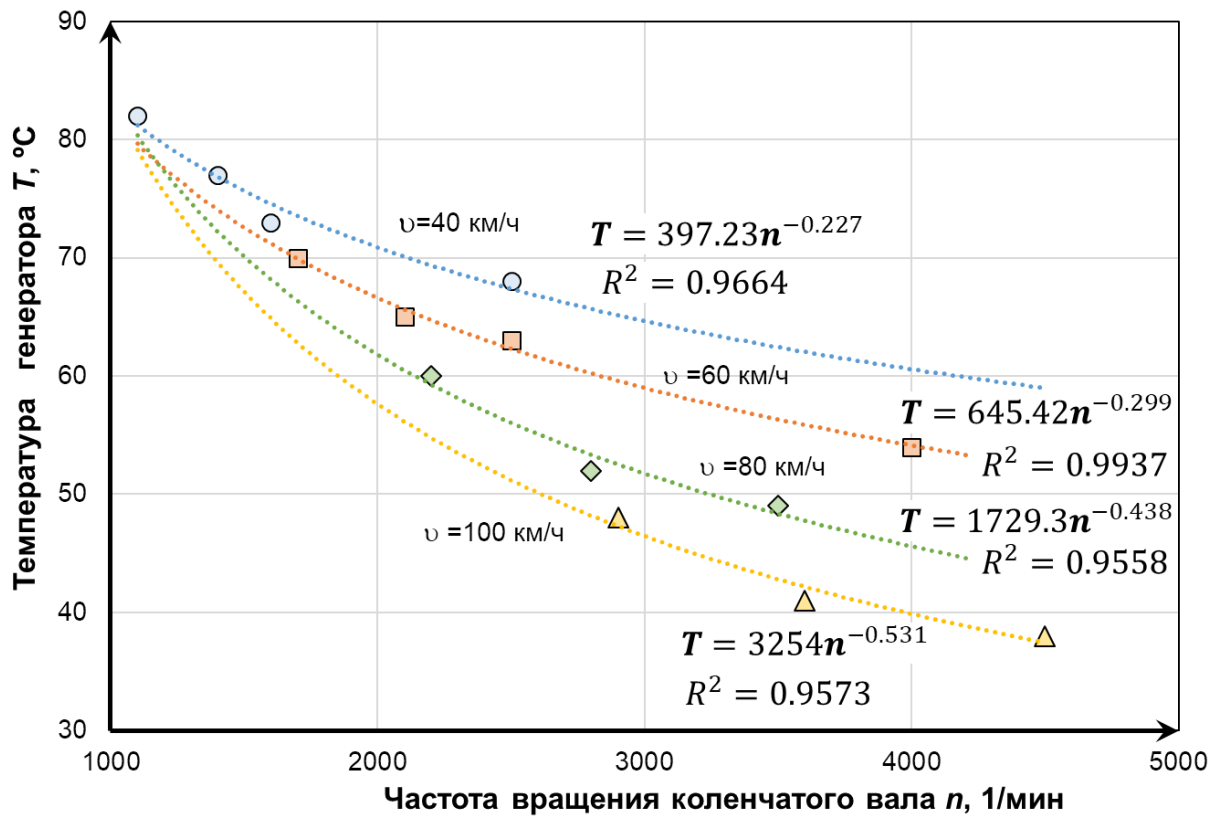


Рисунок 15.9 – Зависимость температуры генератора от частоты вращения коленчатого вала (ротора генератора)

После получения математических моделей, отображающих влияние выбранных факторов на температуру поверхности генератора, были рассчитаны основные статистические характеристики этих моделей. В таблицах 15.1 – 15.3 представлены статистические характеристики для моделей, отображающих влияние температуры окружающего воздуха и тока потребителей на тепловое состояние генератора.

Таблица 15.1 – Основные статистические характеристики регрессионных зависимостей температуры генератора

Наименование характеристики	Значения для регрессионных зависимостей температуры генератора	
	от температуры окружающего воздуха	от тока потребителей
Коэффициент корреляции	0,9816	0,991
Дисперсионное отношение Фишера	114,57	159,78
Критерий Фишера F0.95	5,32	6,61
Средняя ошибка аппроксимации, %	5,67	2,48

Таблица 15.2 – Основные статистические характеристики регрессионных зависимостей температуры генератора от скорости автомобиля

Наименование характеристики	Значения для регрессионных зависимостей			
	V=40 км/ч	V=60 км/ч	V=80 км/ч	V=100 км/ч
Коэффициент корреляции	-0,951	-0,988	-0,955	-0,955
Дисперсионное отношение Фишера	18,97	81,86	10,37	10,52
Критерий Фишера F0.95	7,71	7,71	10,13	10,13
Средняя ошибка аппроксимации, %	2,89	3,22	3,85	4,76

Таблица 15.3 – Основные статистические характеристики регрессионных зависимостей температуры генератора от частоты вращения коленчатого вала

Наименование характеристики	Значения для регрессионных зависимостей		
	n=2000 1/мин	n=3000 1/мин	n=4000 1/мин
Коэффициент корреляции	-0,986	-0,962	-0,967
Дисперсионное отношение Фишера	74,14	12,61	14,50
Критерий Фишера F0.95	7,71	10,13	10,13
Средняя ошибка аппроксимации, %	5,22	5,45	4,45

Результатом проведенных экспериментальных и теоретических исследований стала разработка общей регрессионной модели, в которой отображается изменение температуры поверхности генератора в зависимости от температуры окружающего воздуха, тока потребителей электроэнергии и скорости движения автомобиля. Полученная многофакторная модель представлена в выражении

$$T = 54,697 + 1,8653 \cdot t_B - 0,019 \cdot t_B^2 + 1,0417 \cdot I_{\text{потр}} - 0,2637 \cdot v_a \quad (15.6)$$

Представим разработанную модель в виде трёхмерной поверхности отклика. На рисунках 15.10 – 15.12 изображены диаграммы, в которых отображена зависимость изменения температуры генератора от тока потребителей и скорости движения автомобиля при различных значениях температуры окружающей среды.

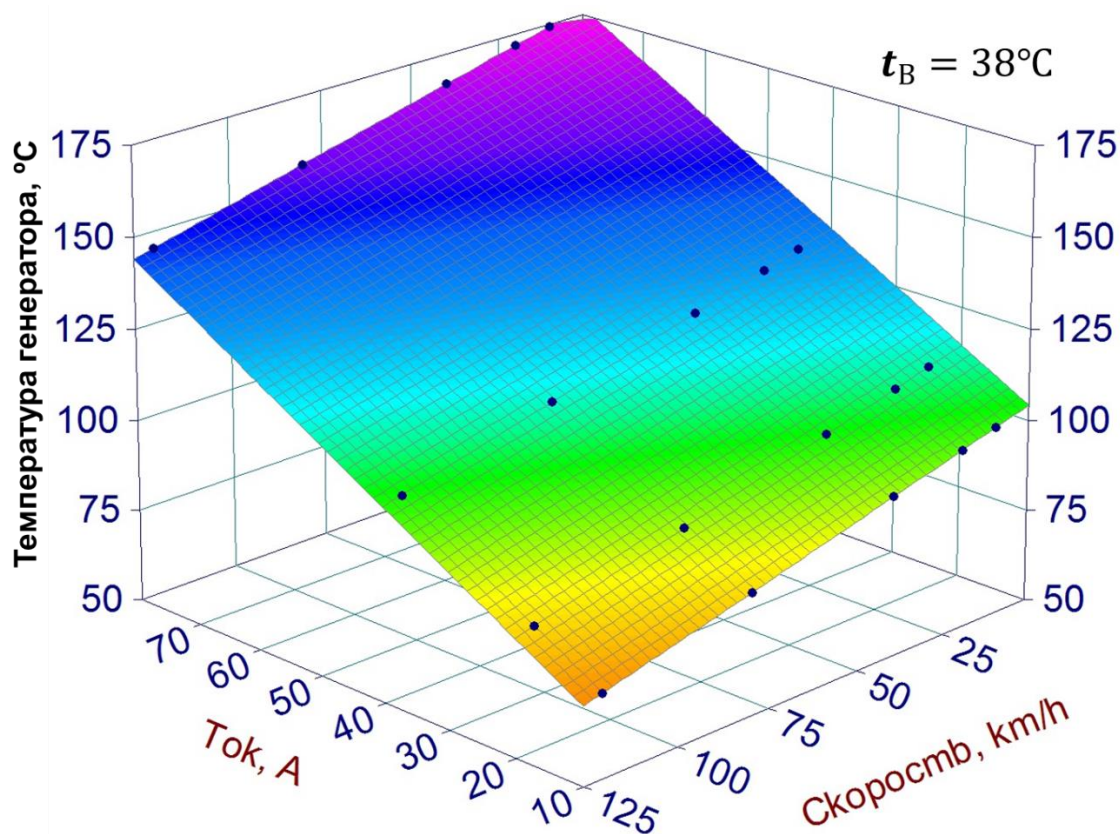


Рисунок 15.10 – Зависимость температуры генератора от эксплуатационных факторов ($t_B = 38^\circ\text{C}$)

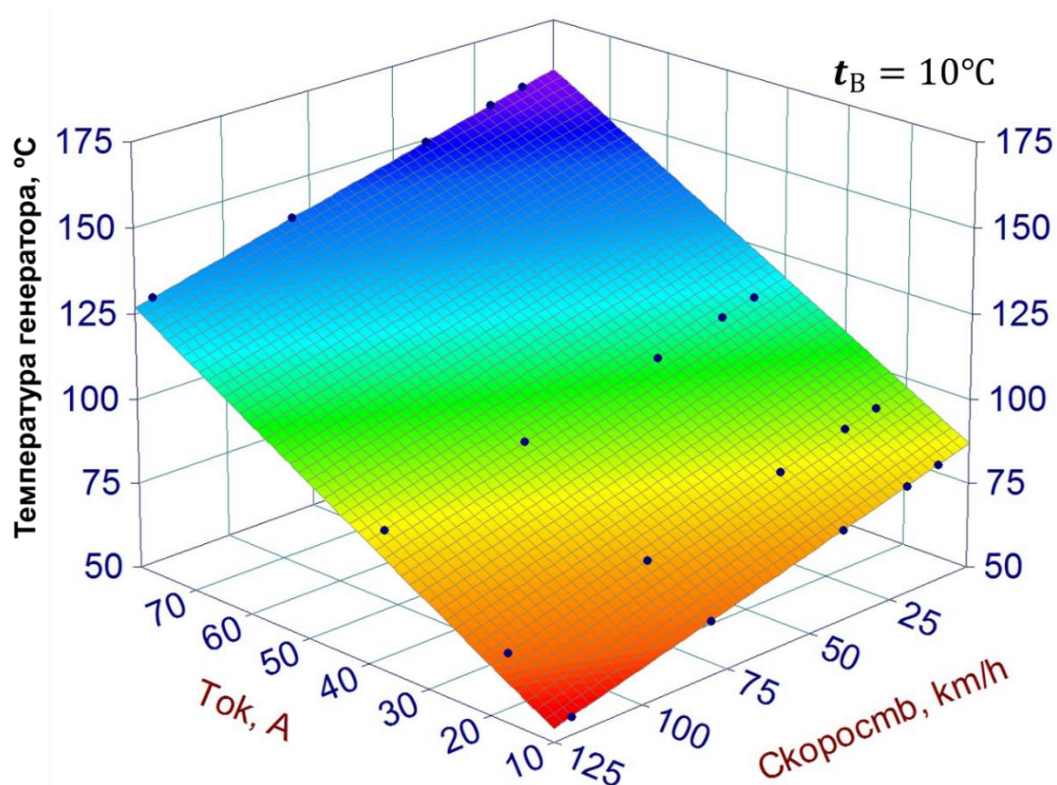


Рисунок 15.11 – Зависимость температуры генератора от эксплуатационных факторов ($t_B = 10^\circ\text{C}$)

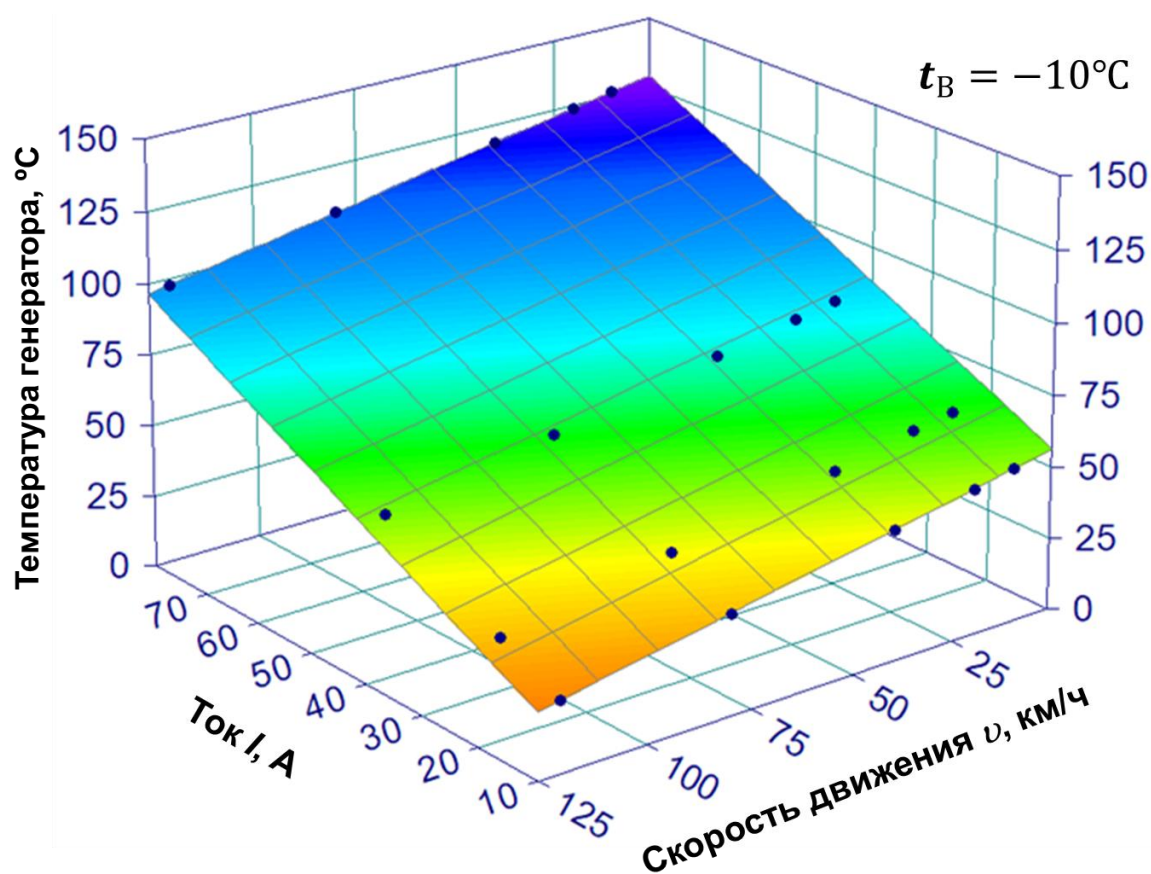


Рисунок 15.12 – Зависимость температуры генератора от эксплуатационных факторов ($t_B = -10^\circ\text{C}$)

Из рисунков 15.10 – 15.12 следует, что неблагоприятное сочетание факторов (движение в городских условиях с частыми остановками, установка дополнительного оборудования и повышенная температура окружающей среды) способствует превышению температурой генератора допустимых значений, а значит, приводит к снижению ресурса работы.

Тем самым экспериментально доказана обоснованность включения температуры окружающего воздуха в модель интенсивности изменения ресурса автомобильных генераторов, как меры негативного воздействия климатических и эксплуатационных факторов.

§3 Выводы по главе

Согласно результатам исследования теплового состояния генератора в лабораторных условиях наличие электрических неисправностей способствует росту температуры генератора, причём величина превышения температуры определяется характером неисправности. Наибольший зафиксированный перегрев соответствует межвитковому замыканию фазы статора, а наименьший – обрыву диода выпрямителя.

Результаты исследования теплового состояния генератора в производственных условиях показали, что температура генератора увеличивается при замедлении и остановке автомобиля, и снижается при повышении скорости движения. Причём, движение в городском цикле значительно увеличивает время выхода генератора на стационарный тепловой режим, что обусловлено частыми остановками и замедлениями автомобиля. Можно сделать вывод, что движение в городских условиях способствует увеличению температуры автомобильных генераторов относительно движения в стационарном режиме на 20-25%.

При неблагоприятном сочетании вышеперечисленных факторов температура генераторов может на 15°C – 20°C превысить нормативную, а, следовательно, сократить ресурс работы генератора.

Часть 6 Практическое использование результатов исследований

Глава 16 Методика оценки и прогнозирования остаточного ресурса автомобильных генераторов

Методика оценки и прогнозирования остаточного ресурса генераторов с учётом условий эксплуатации разработана на основе результатов теоретических и экспериментальных исследований, изложенных в предыдущих разделах, и базируется на результатах диагностирования.

Исходной информацией для прогнозирования остаточного ресурса, исходя из выражения (8.20) является: техническое состояние автомобильного генератора на момент, предшествующий прогнозу; значения констант модели прогнозирования; значения факторов условий эксплуатации на интервале прогнозирования.

Очевидно, что наиболее простое решение определения остаточного ресурса автомобильных генераторов по выражению (8.20), возможно в случае, когда момент диагностирования совпадает с началом месяца и интервал прогнозирования соответствует месячному пробегу автомобиля, то есть факторы условий эксплуатации в этом случае соответственно равны $\Delta L = l_m$ и $\Delta \bar{t}_i = \bar{t}_{вм}$. Однако, для эффективного использования автомобильных генераторов необходимо вести прогнозирование, как при переменном шаге $\Delta L_i = var$, так и при дате диагностирования, не всегда соответствующей началу месяца, то есть при «плавающих» значениях факторов условий эксплуатации.

В этом случае используем разработанный универсальный алгоритм, представленный выражением (8.23), который запишем для многофакторной модели (8.20) следующим образом:

$$\overline{U_{Sn}} = \overline{U_{S1}} + \frac{p}{1!} \cdot \Delta U_1 + \frac{p \cdot (p-1)}{2!} \cdot \Delta^2 U_1 + \frac{p \cdot (p-1) \cdot (p-2)}{3!} \cdot \Delta^3 U_1 + \dots + \Delta^p \cdot U_1 \quad (16.1)$$

где U_{Sn} – изменение ресурса автомобильного генератора на n -ом интервале, %.

$$\Delta U_1 = \overline{U_{Si+1}} - \overline{U_{Si}}; \quad \Delta U_{i+1} = \overline{U_{Si+2}} - \overline{U_{Si+1}}, \quad i = 1, \dots, n$$

$$\Delta^2 U_i = \Delta U_{i+1} - \Delta U_i, \quad i = 1, \dots, n$$

$$\Delta^2 U_{i+1} = \Delta U_{i+2} - \Delta U_{i+1}, \quad i = 1, \dots, n-1$$

$$\Delta^3 U_i = \Delta^2 U_{i+1} - \Delta^2 U_i, \quad i = 1, \dots, n-2$$

.....

$$\Delta^p U_i = \Delta^{p-1} U_{i+1} - \Delta^{p-1} U_i, \quad i = 1, \dots, n-p$$

Иллюстрация прогнозирования интенсивности изменения ресурса автомобильных генераторов по выражению (16.1), при любом интервале прогноза ΔL в реальном диапазоне изменения факторов $\overline{t_b}$, σ_t и при шаге пробега $\Delta l_i = var$ приведена на рисунке 16.1. Прогнозирование ведётся на заданную дату, первый шаг прогноза Δl_1 берётся таким, что конец этого шага приходится на начало следующего месяца, последний шаг Δl_n соответствует пробегу от начала месяца до конечной даты прогноза. Все остальные шаги Δl_i соответствуют среднемесячным пробегам автомобиля.

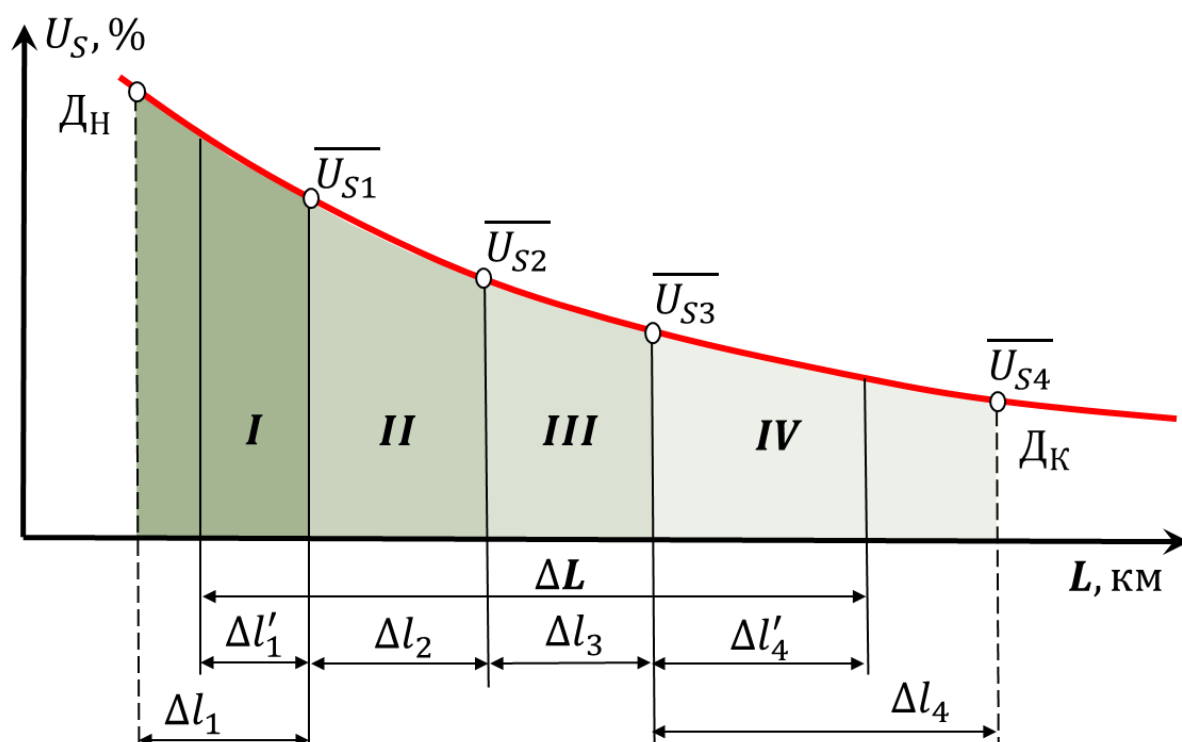
$$\overline{U_s} = 0,062075 + 3,6 \cdot 10^{-6} [(\overline{t_{b1}} - 4,67)^2 + \sigma_t^2] + 9,44 \cdot 10^{-5} \cdot L_i$$

$$\overline{U_s} = 0,062075 + 3,6 \cdot 10^{-6} [(\overline{t_{b1}} - 4,67)^2 + \sigma_t^2] + 9,44 \cdot 10^{-5} \cdot \Delta l'_1 \quad (16.2)$$

$$\overline{U_s} = 0,062075 + 3,6 \cdot 10^{-6} [(\overline{t_{b2}} - 4,67)^2 + \sigma_t^2] + 9,44 \cdot 10^{-5} \cdot (\Delta l'_1 + \Delta l_2)$$

.....

n – количество шагов прогноза; ($n = 5; p = n - 1 = 4$)



D_H – дата диагностирования генератора, D_K – конечная дата прогноза, I – IV – месячные интервалы.

Рисунок 16.1 – Прогнозирование изменения ресурса генератора с заданным интервалом

§1 Методика определения значений факторов условий эксплуатации

Исходной информацией о температурном режиме окружающего воздуха в выражении (16.2) являются значения среднесуточных температур на интервалах, определяемые датами диагностирований. Для практического использования, указанная информация берётся из климатических справочников метеостанций за ряд лет, которую целесообразно представить в виде таблицы (см. приложение Г). По известным датам диагностирований вычисляются средние значения температур на интервалах.

Кроме представления информации о среднемесячных температурах окружающего воздуха в виде таблицы, возможно также получение

регрессионной зависимости изменения $\bar{t}_B$ в течение года. Регрессионную зависимость получим исходя из следующих положений.

Изменение среднемесячной температуры окружающего воздуха за ряд лет носит циклический характер. Известно, что наиболее предпочтительной периодической функцией, аппроксимирующей циклическое изменение показателей какого-либо процесса, является синусоида. Кроме этого, чтобы учесть смещения максимума (или минимума) температуры относительно выбранного начала координат, необходимо взять сумму синуса и косинуса, обеспечивающую «сдвиг по фазе». Так как колебания температуры происходят относительно некоторой ненулевой величины, необходимо ввести в аппроксимирующее выражение постоянное слагаемое, соответствующее этой «средней» температуре.

В итоге регрессионная зависимость может быть записана в следующем виде:

$$\bar{t}_{Bi} = a_0 + a_1 \cdot \cos \frac{2\pi}{N_M} \cdot P_i + a_2 \cdot \sin \frac{2\pi}{N_M} \cdot P_i, \quad (16.3)$$

где a_0, a_1, a_2 – коэффициенты регрессии;

N_M – число временных интервалов (месяцев);

P_i – порядковый номер месяца.

Для нахождения коэффициентов a_0, a_1, a_2 воспользуемся методом наименьших квадратов. При этом, производя замену аргумента тригонометрических функций через Z , получаем систему уравнений:

$$\begin{cases} a_0 \cdot K + a_1 \cdot \sum_{i=1}^K \cos Z_i + a_2 \cdot \sum_{i=1}^K \sin Z_i = \sum_{i=1}^K Y_i \\ a_0 \cdot \sum_{i=1}^K \cos Z_i + a_1 \cdot \sum_{i=1}^K \cos^2 Z_i + a_2 \cdot \sum_{i=1}^K \sin Z_i \cdot \cos Z_i = \sum_{i=1}^K Y_i \cdot \cos Z_i \\ a_0 \cdot \sum_{i=1}^K \sin Z_i + a_1 \cdot \sum_{i=1}^K \cos Z_i \cdot \sin Z_i + a_2 \cdot \sum_{i=1}^K \sin^2 Z_i = \sum_{i=1}^K Y_i \cdot \sin Z_i \end{cases} \quad (16.4)$$

Поскольку $-\pi \leq Z_i \leq \pi$ и шаг по Z_i равномерный, а также учитывая, что функция $\sin Z_i$ нечётная, получаем:

$$\sum_{i=1}^K \sin Z_i = 0, \sum_{i=1}^K \sin Z_i \cdot \cos Z_i = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^K \sin 2Z_i = 0. \quad (16.5)$$

Поэтому система (16.4) значительно упрощается:

$$\begin{cases} a_0 \cdot K + a_1 \cdot \sum_{i=1}^K \cos Z_i = \sum_{i=1}^K Y_i \\ a_0 \cdot \sum_{i=1}^K \cos Z_i + a_1 \cdot \sum_{i=1}^K \cos^2 Z_i = \sum_{i=1}^K Y_i \cdot \cos Z_i \\ a_2 \cdot \sum_{i=1}^K \sin^2 Z_i = \sum_{i=1}^K Y_i \cdot \sin Z_i \end{cases} \quad (16.6)$$

Используя программный продукт Excel, получаем значения коэффициентов a_0, a_1, a_2 .

Таким образом, среднемесячная температура окружающего воздуха г. Оренбурга, полученная по многолетним данным аппроксимируется следующим выражением:

$$\overline{t_{\text{вл}}} = 2,7316 - 20,374 \cdot \cos \frac{\pi}{6} P_i - 4,714 \cdot \sin \frac{\pi}{6} P_i. \quad (16.7)$$

Следовательно, с помощью полученной регрессионной зависимости (16.7), подставляя значения временных интервалов, например, $P_1 = 1, P_{1,5} = 1,5, P_2 = 2$ можно предсказать среднемесячную температуру окружающего воздуха для конкретного интервала.

Графическое представление зависимости (16.7) представлено на рисунке 16.2.

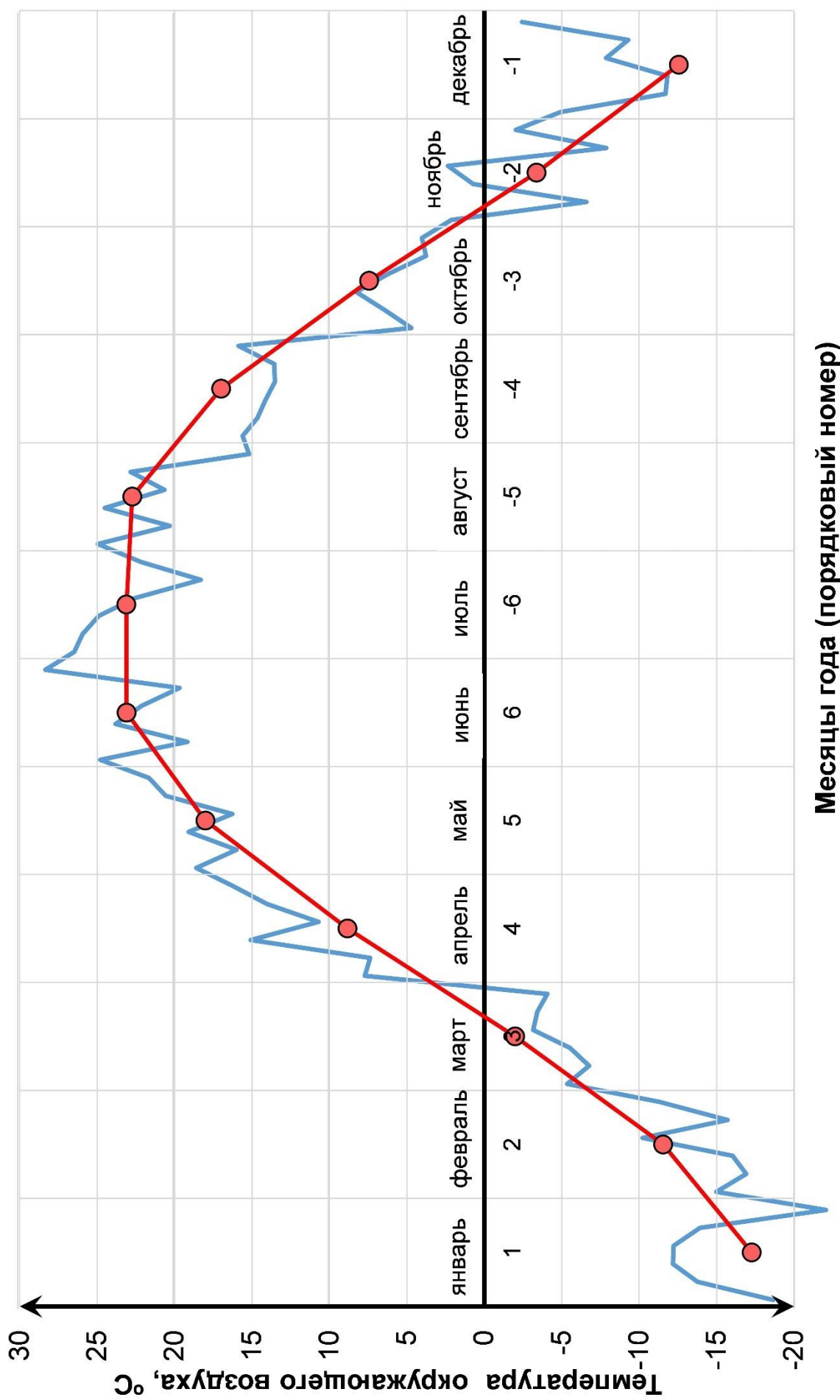


Рисунок 16.2 – График изменения среднемесячной температуры (г. Оренбург)

Для прогнозирования остаточного ресурса автомобильных генераторов необходимо учитывать колебания температуры окружающего воздуха, которые определяются среднеквадратичным отклонением температуры по месяцам σ_t . Однако, среднеквадратичное отклонение температуры окружающего воздуха по месяцам на метеостанциях не фиксируется, следовательно, его среднемесячное значение на основе многолетних наблюдений получить невозможно.

Поэтому значения σ_t целесообразно получить по математической модели, отражающей зависимость $\sigma_t = f(\bar{t}_B)$. Для установления вида зависимости используются численные значения этих показателей за последние годы. Так, для г. Оренбурга изменение среднемесячной температуры окружающего воздуха и ее среднеквадратичное отклонение представлены на рисунке 16.3. Аппроксимация экспериментальных точек в этом случае осуществлялась полиномиальной функцией вида

$$\sigma_{ti} = 0,0045 \cdot \bar{t}_{Bt}^2 - 0,0508 \cdot \bar{t}_{Bt} + 0,7419. \quad (16.8)$$

Основные статистические характеристики уравнения нелинейной регрессии представлены в таблице 16.1. Индекс корреляции вычислим по формуле:

$$p_{xy} = \sqrt{1 - \frac{\sigma_{\varepsilon}^2}{\sigma_y^2}}, \quad (16.9)$$

где $\sigma_{\text{ост}}^2$ – остаточная дисперсия, вычисленная по формуле (3.15);

σ_y^2 – общая дисперсия результативного признака.

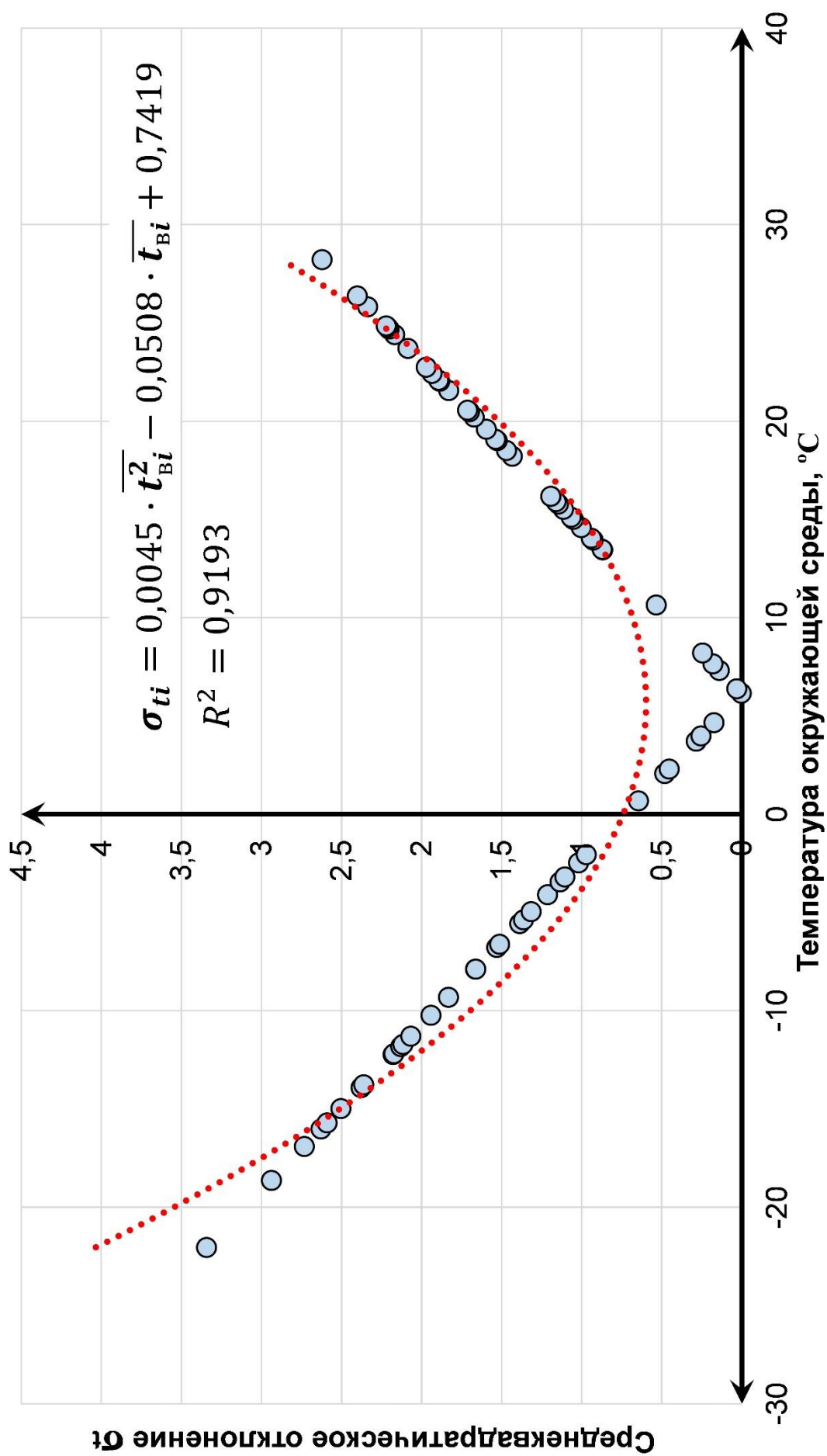


Рисунок 16.3 – Среднеквадратичное отклонение температуры окружающего воздуха в г. Оренбурге

Статистическая оценка значимости индекса корреляции проводилась с использованием критерия Стьюдента по следующей формуле [76]:

$$t_{\text{ст}}^{\text{опыт}} = r_{yx} \cdot \sqrt{n-2} / \sqrt{1-r_{yx}^2}, \quad (16.10)$$

где r_{yx} – индекс корреляции

Поскольку $t_{\text{расч.}} > t_{\text{табл.}}$, следовательно, коэффициент корреляции значим.

Проверка полученного уравнения регрессии на адекватность проводилась с помощью коэффициента детерминации, значимость которого проверялась с помощью критерия Фишера по формуле (14.8). Поскольку $F_{\text{расч.}} > F_{\text{табл.}}$, то полученное уравнение адекватно описывает исследуемый процесс.

Таблица 16.1 – Статистические характеристики уравнения регрессии, устанавливающего связь между среднемесячной температурой окружающего воздуха и её среднеквадратичным отклонением

Наименование характеристики	Численное значение
Индекс корреляции	0,966
Критерий Стьюдента (t)	
расчётное значение	31,4
табличное значение ($t_{0,05, 72}$)	2,00
Индекс детерминации	0,933
Критерий Фишера (F)	
расчётное значение	486
табличное значение ($F_{0,05, 72}$)	2,74
Средняя ошибка аппроксимации	

В случае, когда начало или конец шага прогнозирования не совпадает с началом месяца, величина фактора – длительность эксплуатации определяется следующим выражением:

$$\Delta l_{\text{н}} = l_{\text{м}} \cdot \frac{D_{\text{к}} - D_i}{D_{\text{к}}} ; \quad \Delta l_{\text{к}} = l_{\text{м}} \cdot \frac{D_i}{D_{\text{к}}} , \quad (16.11)$$

где $\Delta l_{\text{н}}$ – длительность эксплуатации, соответствующая первому шагу прогноза, км;

$\Delta l_{\text{к}}$ – длительность эксплуатации, соответствующая последнему шагу прогноза, км;

D_i – количество дней месяца, соответствующих началу или концу прогноза соответственно на первом и последнем шаге;

$D_{\text{к}}$ – количество дней к-того месяца;

$l_{\text{м}}$ – среднеемесячный пробег автомобиля, км.

На остальных шагах прогноза $\Delta L = l_{\text{м}}$.

Конечная дата прогноза ($D_{\text{кон}}$) определяется, исходя из известной даты диагностирования ($D_{\text{н}}$), задаваемой наработкой ΔL , среднеемесячного пробега следующим образом:

$$D_{\text{кон}} = D_{\text{н}} + M ; \quad M = \Delta L / l_{\text{м}} , \quad (16.12)$$

где M – величина интервала прогнозирования в месяцах.

Результаты проверки работоспособности методики оценки и прогнозирования остаточного ресурса автомобильных генераторов приведены в таблице 16.2. При проведении расчётов использовались выражения (14.2), (14.9), (16.1), (16.6) – (16.9), а также рисунок 16.1.

Таблица 16.2 – Проверка методики оценки и прогнозирования остаточного ресурса автомобильного генератора

Наименование показателя	Обозначение	Значение показателя
1	2	3
Даты диагностирования	Дн	20.06.2015
	Дк	20.04.2016
Пробег на момент диагностирования	Lн, км	40000
	Lк, км	48000
Среднемесячный пробег на интервалах прогноза		
июнь	l_{MI} , км	400
июль	l_{MII} , км	1200
август	l_{MIII} , км	1200
сентябрь	l_{MIV} , км	900
октябрь	l_{MV} , км	800
ноябрь	l_{MVI} , км	700
декабрь	l_{MVII} , км	600
январь	l_{MVIII} , км	500
февраль	l_{MIX} , км	500
март	l_{MX} , км	600
апрель	l_{MXI} , км	600
Текущее значение диагностического параметра на момент диагностирования	Стн, В	3,4
	Стк, В	5,2
Интенсивность изменения ресурса генератора, соответствующая моменту диагностирования	Ун, %	6,67
	Ук, %	6,94
Ресурс генератора на момент диагностирования	Rшн, %	81,52
	Rск, %	71,20
Интенсивность изменения ресурса генератора на интервалах прогноза		
июнь	U _I , %	6,428
июль	U _{II} , %	6,336
август	U _{III} , %	6,260
сентябрь	U _{IV} , %	6,264
октябрь	U _V , %	6,216
ноябрь	U _{VI} , %	6,232
декабрь	U _{VII} , %	6,234
январь	U _{VIII} , %	6,324
февраль	U _{IX} , %	6,314
март	U _X , %	6,244
апрель	U _{XI} , %	6,246
Расчётное значение интенсивности изменения ресурса на прогнозируемый период	U ₁₁ , %	12,88%
Прогнозируемый остаточный ресурс	R _{прогн} , %	68,64
Погрешность прогнозирования остаточного ресурса по разработанной методике	ΔR_s , %	3,59

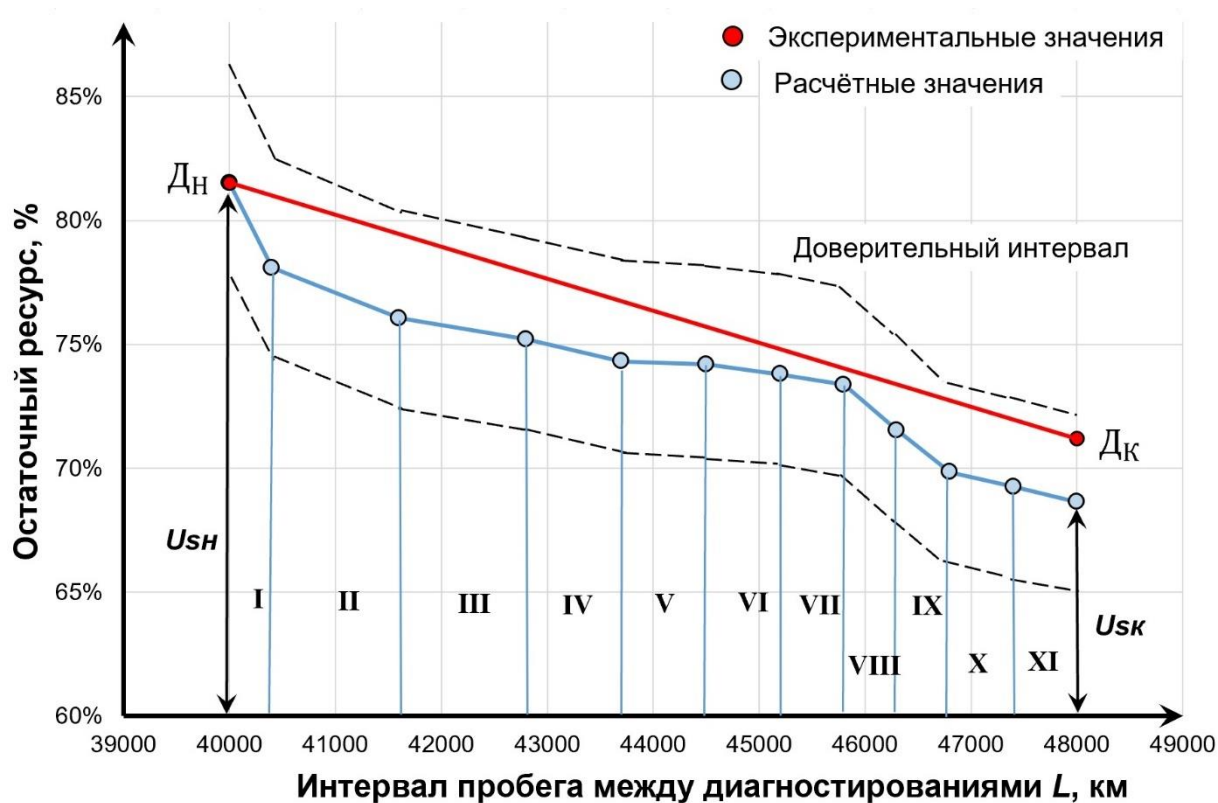


Рисунок 16.4 – Графическое представление изменения ресурса генератора на интервале прогноза

Исходя из расчётов, приведённых в таблице 16.2, следует, что погрешность прогнозирования остаточного ресурса автомобильных генераторов по разработанной методике, на интервале пробега, соответствующего техническому обслуживанию легковых автомобилей, составляет около 3,5%.

Точность и достоверность прогнозирования на основе выражения (16.1) определяется соответственно доверительным интервалом прогноза ($\pm\Delta$) и вероятностью осуществления прогноза для этого интервала. Тогда имеем:

$$U_{Sn} \pm \Delta_p, \quad (16.13)$$

где $\Delta_{(p)}$ – доверительный интервал при заданной достоверности прогнозирования p .

Доверительный интервал можно представить следующим образом [18, 38]:

$$\Delta_p = t_{(p,n-1)} \cdot m_y, \quad (16.14)$$

где $t_{(p,n-1)}$ – коэффициент Стьюдента, соответствующий заданной доверительной вероятности p и числа измерений n ;

m_y – средняя ошибка прогноза.

$$m_y = \sigma_\varepsilon \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(x_p - \bar{x})^2}{\sum (x_i - \bar{x})^2}}. \quad (16.15)$$

Доверительный интервал прогноза:

$$U_{Sx} - \Delta_p \leq U_{Sx} \leq U_{Sx} + \Delta_p, \quad (16.16)$$

где U_{Sx} – точечный прогноз диагностического параметра.

§2 Прогнозирование остаточного ресурса автомобильных генераторов на основе разработанного алгоритма

В основу алгоритма оценки и прогнозирования остаточного ресурса автомобильных генераторов положены:

- диагностическая информация (среднее значение U_d и размах колебаний выходного напряжения ΔU), получаемая с помощью разработанного экспресс-метода, и служащая для определения технического состояния генератора и оценки текущего значения ресурса (в процентах);

- сведения об интервале пробега, включающие начальную и конечную дату прогноза и среднемесечном пробеге автомобиля;
- значение температуры окружающего воздуха, соответствующей минимальной интенсивности изменения ресурса, полученной в главе 14;
- данные о среднемесечной температуре окружающего воздуха и её среднеквадратичного отклонения, расчёт которых для заданного интервала пробега осуществляется по формулам (16.7) и (16.8).

На первом этапе путём сравнения полученного значения U_d с нормативным значением, приведённым в технической документации, определяется исправность/неисправность регулятора напряжения, поскольку его состояние не вносит изменений в основной диагностический параметр – размах колебаний выходного напряжения. Сравнивая полученное значение размаха колебаний выходного напряжения ΔU с допустимым, выявляют наличие или отсутствие неисправностей обмотки статора и выпрямительного блока генератора.

Если размах колебаний выходного напряжения превышает предельное значение, то дальнейшая эксплуатация автомобильного генератора нецелесообразна, и необходимы либо ремонтные воздействия (замена отказавшего узла генератора), либо замена генератора в целом.

На втором этапе возможна оценка текущего значения ресурса автомобильного генератора (в процентах).

Если необходима информация об изменении ресурса генератора на заданном интервале прогнозирования, либо о величине остаточного ресурса в километрах пробега, необходимы расчётные процедуры.

Рассмотрим определение прогнозируемого значения остаточного ресурса генератора на заданном интервале.

Для получения точного значения необходима информация о средних значениях пробега, температуры окружающего воздуха и её среднеквадратичного отклонения на каждом из месячных интервалов, на которые разбивается заданный интервал прогноза. На основании этих

данных рассчитывается интенсивность изменения ресурса генератора (14.2) на каждом из месячных интервалов, и, используя универсальный алгоритм (16.1) находится значение остаточного ресурса на конечную дату прогноза.

Графическое представление разработанного алгоритма приведено на рисунке 16.6.

Показателем качества прогнозирования является отношение длительности прогнозируемого периода $T_{\text{п}}$ к продолжительности периода ретроспекции $T_{\text{р}}$:

$$k_{\text{пр}} = T_{\text{п}}/T_{\text{р}} . \quad (16.17)$$

С целью обеспечения достоверности результатов прогнозирования рекомендуется придерживаться значений коэффициента $k_{\text{пр}} \leq 0,3 - 0,5$.

Интерфейс программы для ЭВМ, разработанной на базе данного алгоритма представлен на рисунке 16.5.

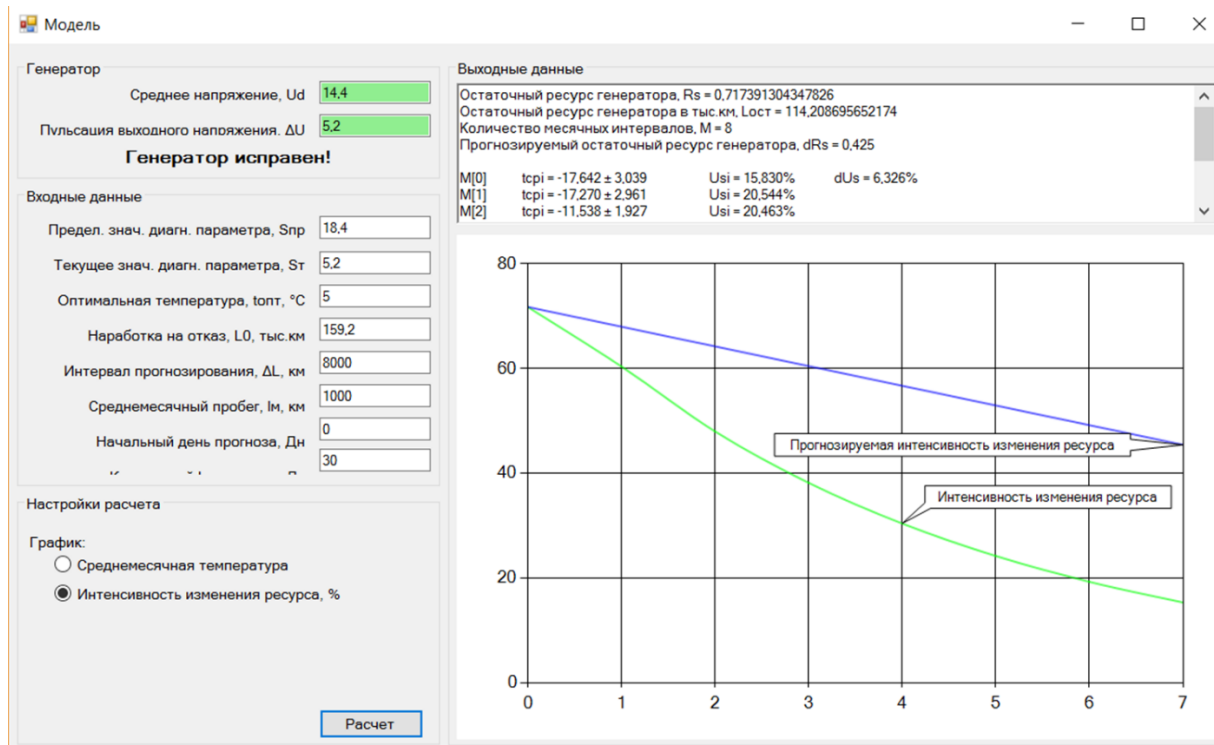


Рисунок 16.5 – Интерфейс программы прогнозирования остаточного ресурса автомобильных генераторов

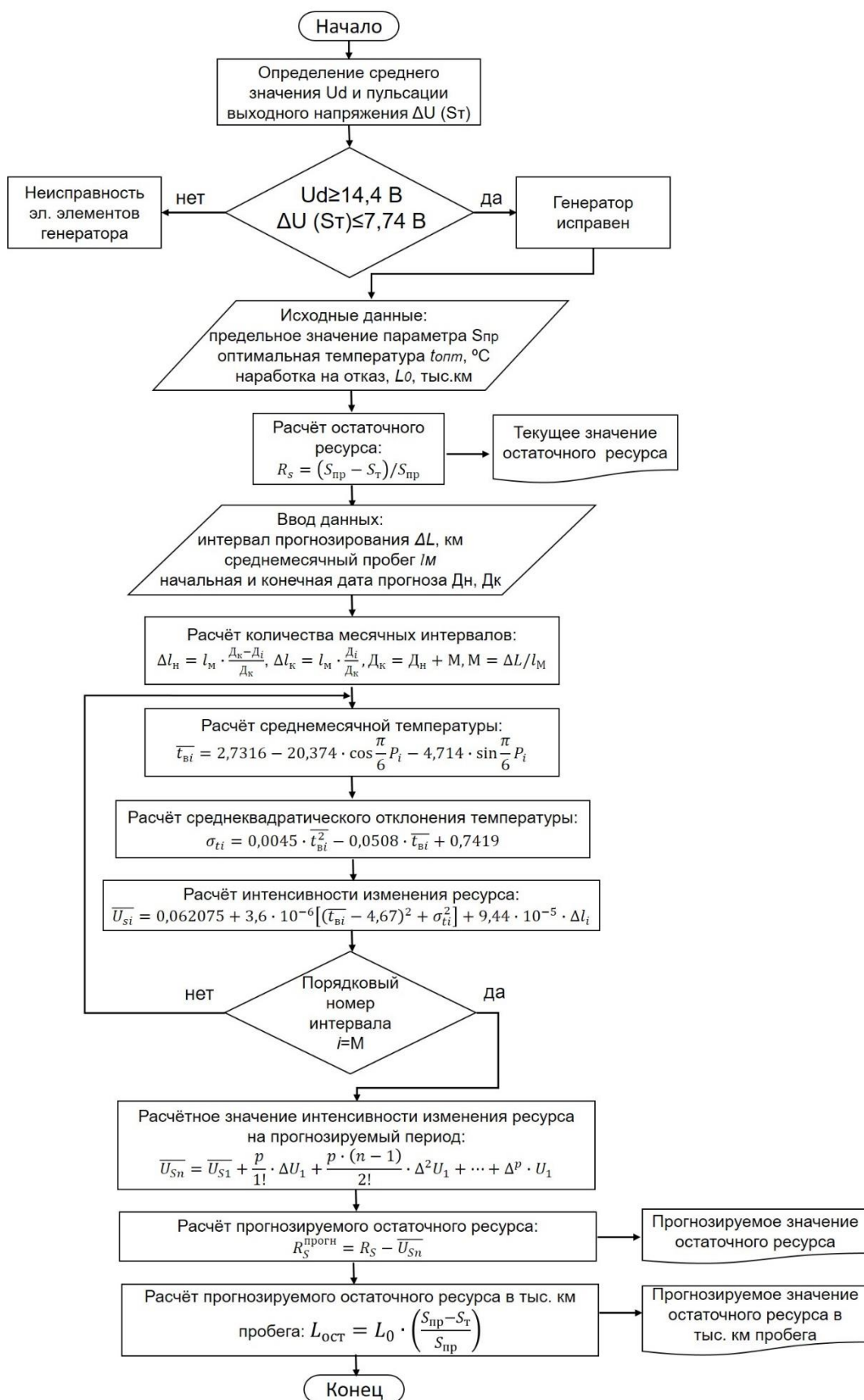


Рисунок 16.6 – Алгоритм программы для прогнозирования остаточного ресурса автомобильных генераторов

§3 Выводы по главе

Разработана регрессионная модель, аппроксимирующая экспериментальные значения вариации температуры окружающего воздуха, как основного фактора, необходимого для прогнозирования остаточного ресурса автомобильных генераторов. Проверка полученного уравнения регрессии с помощью критерия Фишера показала, что полученное уравнение адекватно описывает исследуемый процесс.

Погрешность разработанной методики оценки и прогнозирования остаточного ресурса автомобильных генераторов, на интервале пробега, соответствующего техническому обслуживанию легковых автомобилей, не превышает 3,5%.

Разработан алгоритм и программа оценки и прогнозирования остаточного ресурса автомобильных генераторов, в котором впервые учтена величина размаха колебаний выходного напряжения.

Глава 17 Определение оптимальной периодичности диагностирования автомобильных генераторов

§1 Методы определения периодичности диагностирования

Под периодичностью понимается наработка между двумя последовательными видами диагностирования. Уменьшение периодичности диагностирования приводит к снижению эксплуатационных расходов, полному использованию ресурса узлов и агрегатов машин, но при этом к увеличению материальных и трудовых затрат на диагностирование. При увеличении периодичности диагностирования затраты на

диагностирование снижаются, но при этом увеличиваются издержки на эксплуатацию автомобилей, в том числе вызванные недоиспользованием ресурса их узлов и агрегатов.

С учётом этого определяется оптимальная периодичность диагностирования.

Под оптимальной периодичностью диагностирования понимается такая периодичность, при которой обеспечивается надёжная работа машины и её элементов при минимальных затратах средств на диагностирование.

Существуют различные методы определения оптимальной периодичности диагностирования: по допустимой вероятности безотказной работы, по реализации диагностического параметра, технико-экономический, экономико-вероятностный, рассмотренные в работах Авдонькина Ф.Н., Аринина И.Н., Борца А.Д., Мигаля В.Д., Кузнецова Е.С., Харазова А.М. и других.

В работе [27] В. С. Малкин предлагает оптимальную периодичность диагностирования T_D^{opt} , км, находить по формуле:

$$T_D^{opt} = T_0 \cdot \frac{\sqrt{a}}{2-\sqrt{a}} \cdot (1 - \sqrt{a} + e^{\sqrt{a}}) \quad (17.1)$$

где T_0 – средняя наработка на отказ, км.;

a – вспомогательный коэффициент, равный

$$a = C_D / C_0 \quad (17.2)$$

где C_D – затраты на диагностирование и сопутствующие профилактические работы по поддержанию генераторов в исправном состоянии, р.;

C_0 – затраты, связанные с устранением возникшего отказа, р.

Харазов А.М. в работе [50] периодичность диагностирования вычисляет в следующей последовательности:

1) Рассчитывают коэффициент своевременности выполнения диагностирования γ , характеризующий вероятность попадания случайной величины на заданный участок:

$$\gamma = C_D / C_0 \quad (17.3)$$

2) По статистическим данным отказов диагностируемого узла определяют характер распределения отказов, то есть строят функцию плотности распределения отказов $f(t)$ и определяют среднее квадратическое отклонение наработки на отказ σ и среднестатистическое значение наработки диагностируемого узла на отказ $\bar{t}$.

3) Затем по справочным математическим таблицам значений функции нормального распределения находят $\Phi(t_i/\sigma)$. Отклонение оптимального значения наработки до первого диагностирования t_i от среднестатистического значения наработки узла на отказ определяют из зависимости:

$$\Phi(t_i/\sigma) = 1 - \gamma \quad (17.4)$$

4) Периодичность диагностирования составит:

$$t_D = \bar{t} - t_i \quad (17.5)$$

Анализ результатов вычислений по вышеперечисленным методикам и методикам, приведённым в работах [3, 29], показывает, что полученные значения периодичности диагностирования образуют две группы: от 20 до 40 тыс. км и от 75 до 110 тыс. км. Учитывая такой разброс численных значений, обоснуем выбор оптимальной периодичности диагностирования.

У большинства машин период нормальной эксплуатации, где имеют место только внезапные отказы, довольно значительный по наработке. Проводить диагностирование в этот период нецелесообразно, так как постепенные отказы ещё не наступили, а внезапные отказы предсказать с помощью диагностирования довольно сложно.

Учитывая это, для элементов машин, подвергающихся постепенным отказам целесообразно начинать проводить диагностирование в конце периода нормальной эксплуатации [45].

Величину наработки начала постоянного диагностирования определим при помощи экономико-вероятностного метода, заключающегося в оптимизации периодичности диагностирования по критерию минимума суммарных удельных затрат на ремонт и диагностирование.

Согласно методике филиала НАМИ, изложенной в [49] целевая функция издержек на диагностирование генератора в зависимости от периодичности диагностирования на тыс. км пробега L имеет вид:

$$C(L) = L^{-1} \cdot [B + A \cdot p_a(L) + D \cdot (t_b + t_a \cdot p_a(L))] \rightarrow \min, \quad (17.6)$$

где B – затраты на одно диагностирование, принимаем $B = 100$ р.;

A – затраты на аварийный ремонт генератора, принимаем $A = 5500$ р.;

D – удельная чистая прибыль, приносимая автомобилем за 1 ч. эксплуатации, р./ч. Принимаем $D = 1000$ р./ч.;

$p_a(L)$ – автомобили, для которых будет произведен аварийный ремонт на пробеге L ;

t_b – время на одно диагностирование генератора, $t_b = 0,083$ ч.;

t_a – время, отведенное на аварийный ремонт генератора, $t_a = 3,14$ ч.;

L – пробег автомобиля, тыс. км.

Для определения составляющих $p_a(L)$, необходимо знать зависимость вероятности безотказной работы элемента $Q(L)$ за пробег L автомобиля.

Текущая вероятность безотказной работы p_T :

$$p_T = 1 - n/N_H, \quad (17.7)$$

где $n = N_H - N_K$ – число машин, имеющих отказы генераторов в заданном интервале наработки, ед.;

N_H – число машин контрольной группы, ед.;

N_K – число машин, не имеющих отказов генераторов в заданном интервале наработки, ед.

Вероятность отказов и безотказной работы, рассчитанная по результатам экспресс-диагностирования автомобильных генераторов представлена на рисунке 17.1.

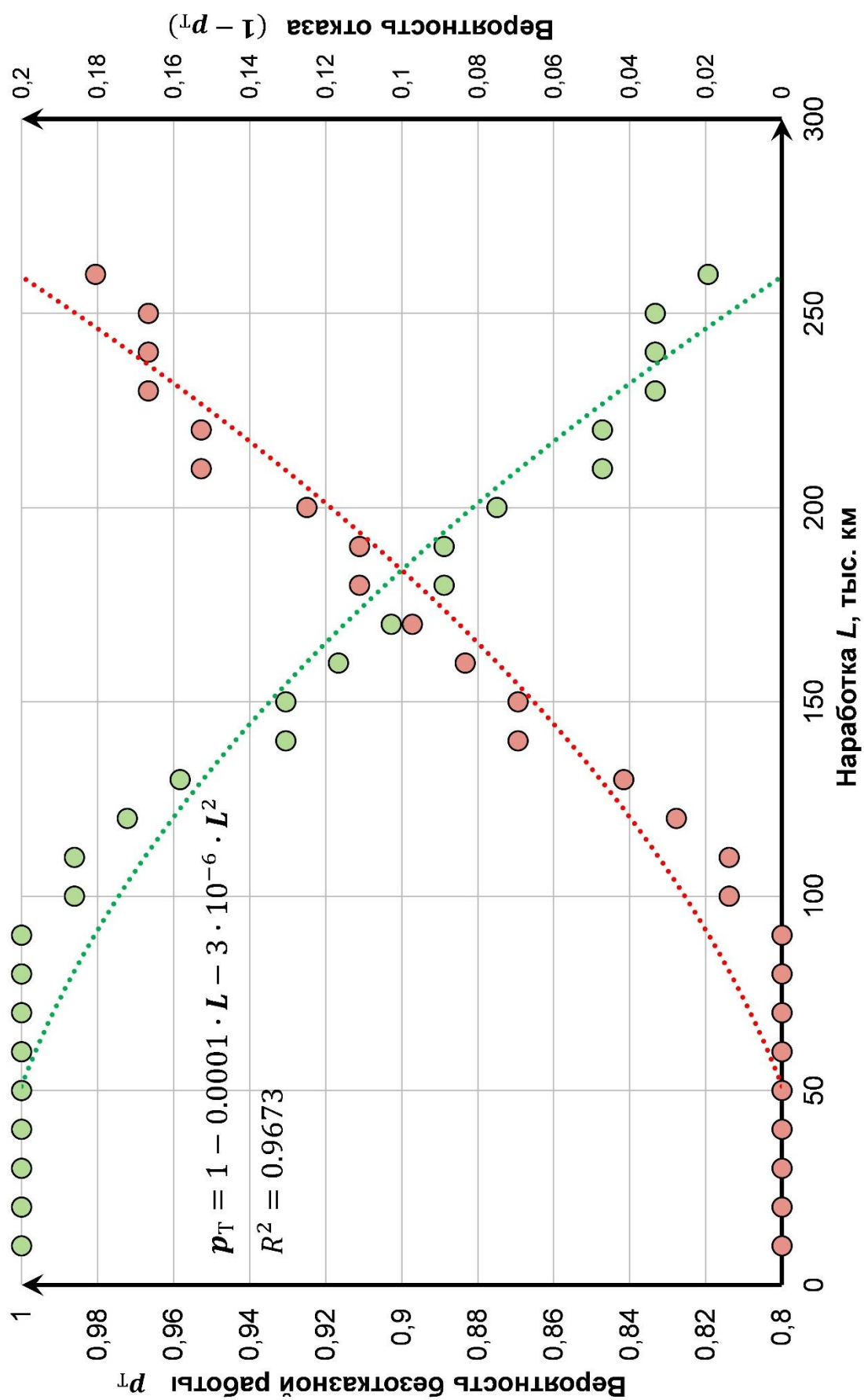


Рисунок 17.1 – Изменение вероятности отказа и безотказной работы автомобильных генераторов с увеличением наработки

§2 Определение периодичности диагностирования

Расчёт удельных издержек выполнен для интервала периодичности диагностирования 10 – 270 тыс. км. Периодичность первого диагностирования согласно выражению (17.6) составила 100 тыс. км. пробега (рисунок 17.2). Корректируя полученное значение с установленной периодичностью технического обслуживания (для автомобилей ВАЗ она составляет $L_{T0} = 15$ тыс. км), окончательно получаем $L_d^1 = 105$ тыс. км.

После определения наработки начала диагностирования определяют дальнейшую периодичность диагностирования методом допустимой вероятности безотказной работы. Для наиболее ответственных элементов автомобиля задаются вероятностью безотказной работы $p_T = 0,95 - 0,90$, а для остальных элементов – $p_T = 0,90 - 0,85$.

Число машин, имеющих n отказов генераторов за период наработки l_d :

$$n = \lambda \cdot \left(\frac{N_H + N_K}{2} \right) \cdot \tau_d, \quad (17.8)$$

где $\lambda = 1/L_0$ – параметр потока отказов в заданном интервале наработки, ед./тыс. км;

L_0 – средняя наработка на отказ, км;

L_d – периодичность диагностирования, тыс. км.

$$L_d^{\text{опт}} = \sum_{i=1}^n L_i / \sum_{i=1}^n r_i, \quad (17.9)$$

где L_i – наработка на отказ i – того генератора, тыс. км;

r_i – суммарное число отказов генераторов.

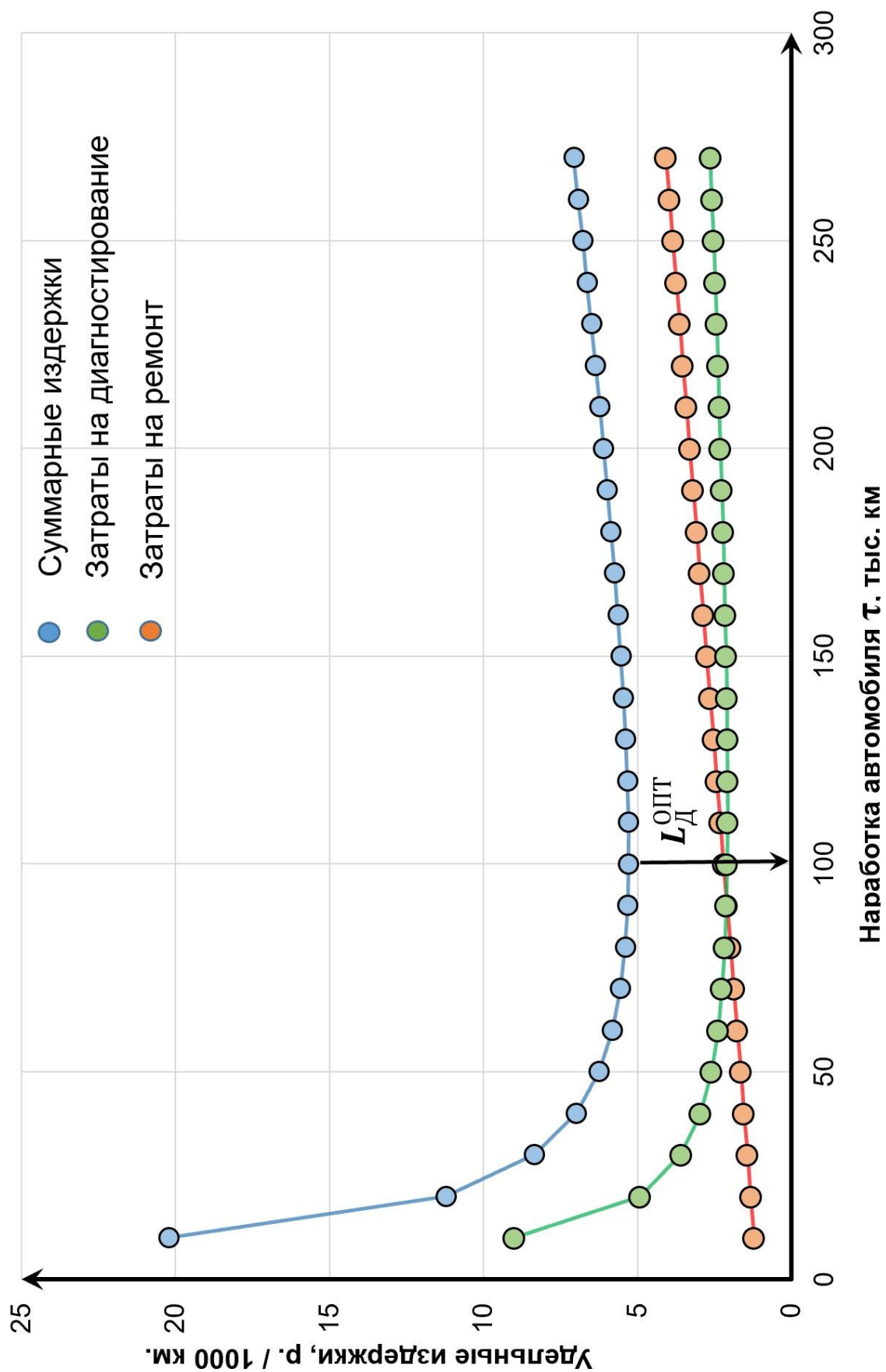


Рисунок 17.2 – Определение наработки начала диагностирования

После преобразований получаем:

$$L_d = 2 \cdot (1 - p_T) / \lambda \cdot (1 + p_T) . \quad (17.10)$$

Задаваясь вероятностью безотказной работы $p_T = 0,80 - 0,95$, получим следующие значения оптимальной периодичности диагностирования (см. таблицу 17.1).

Таблица 17.1 – Определение периодичности диагностирования

Вероятность безотказной работы, p_T	0,80	0,85	0,90	0,95
Периодичность диагностирования, L_d , тыс. км	53,24	41,67	29,04	15,21
Скорректированная периодичность диагностирования, L_d , тыс. км	60	45	30	15

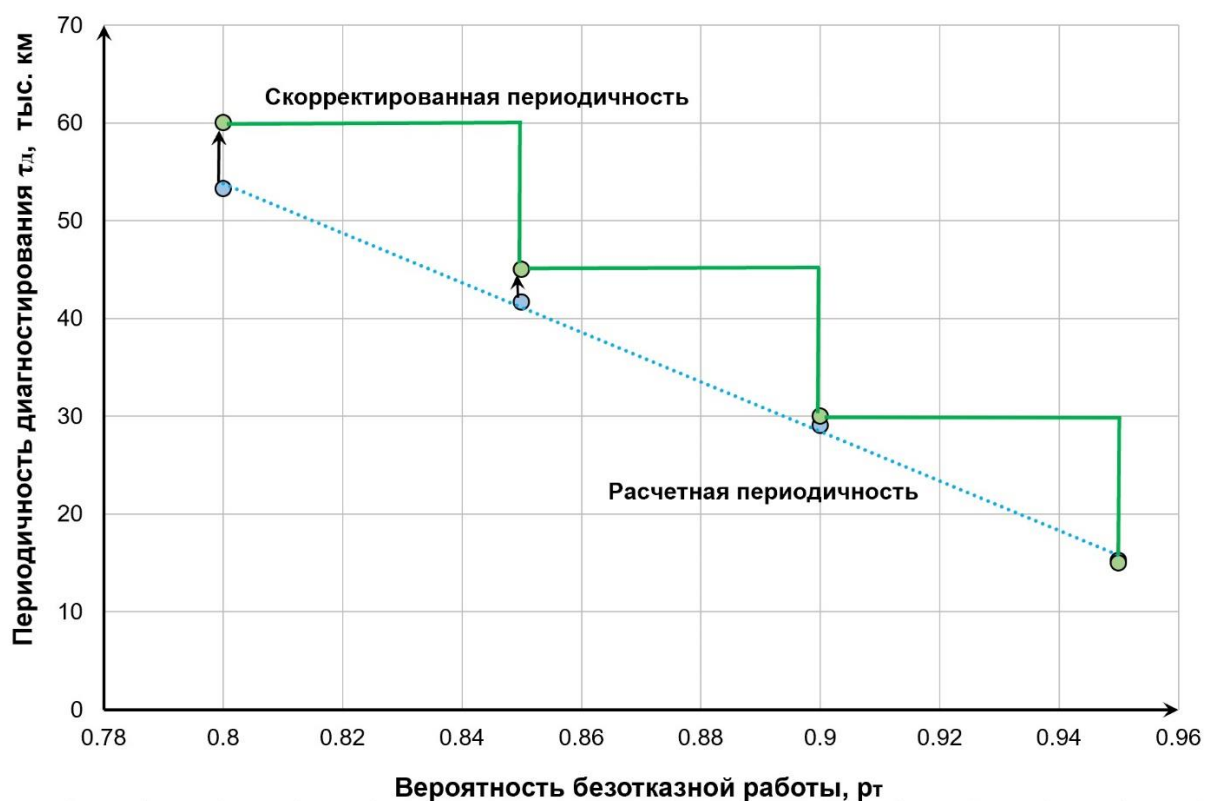


Рисунок 17.3 – Определение периодичности последующих диагностирований

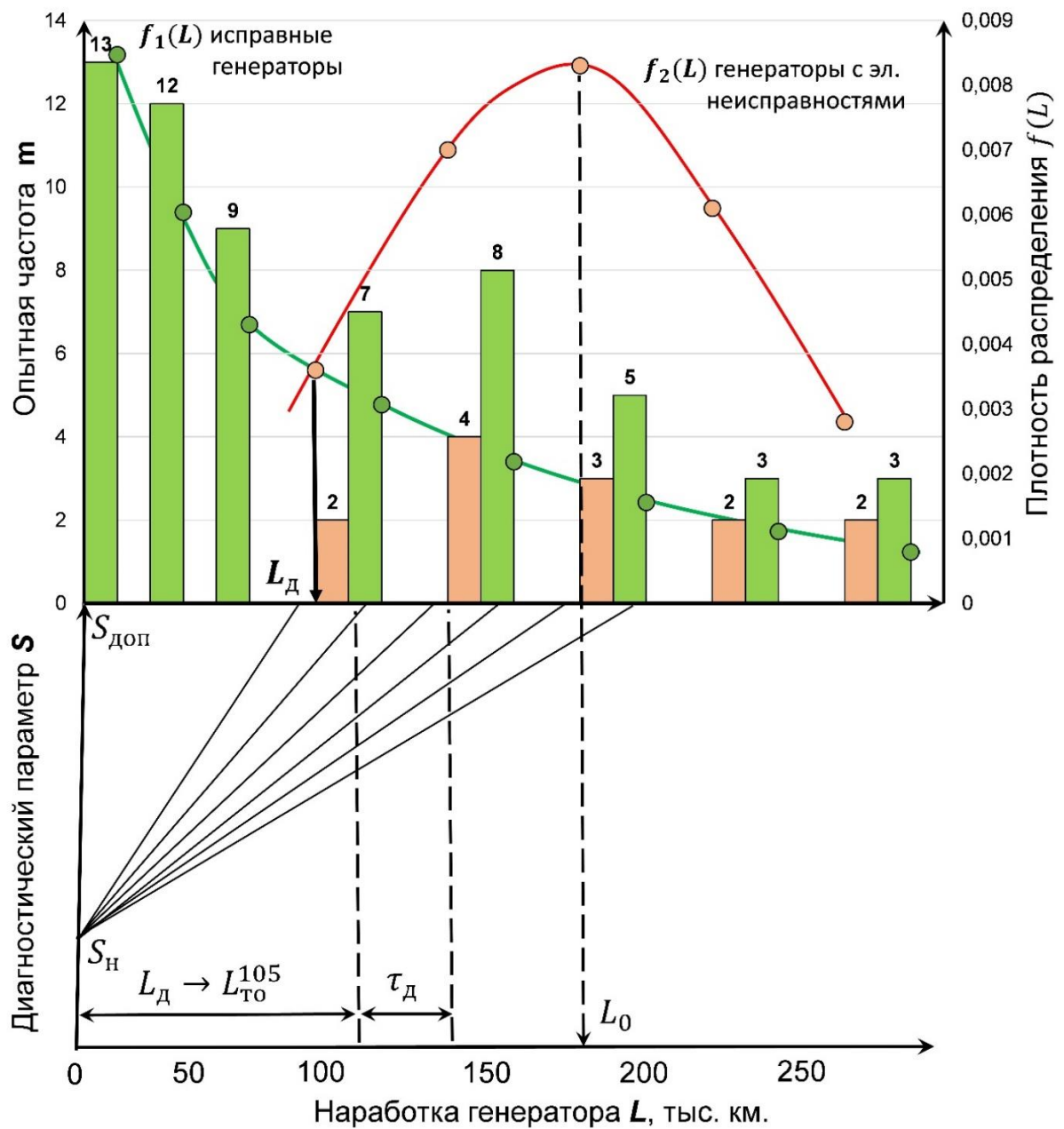


Рисунок 17.4 – Схема определения периодичности диагностирования

Таким образом, рекомендуется проводить первое диагностирование при наработке $L_D^1 = 105$ тыс. км. и далее постоянно, с установленной периодичностью диагностирования $L_D = 30$ тыс. км.

§3 Оценка экономической эффективности от использования результатов исследований

Использование на автотранспортных предприятиях разработанной методики оценки и прогнозирования остаточного ресурса в процессе управления работоспособностью автомобильных генераторов позволяет более полно использовать их потенциальные возможности, снизить простои автомобилей в ремонте, рационально распределить материальные и трудовые ресурсы и получить в результате экономический эффект.

Определение годового экономического эффекта производилось по формуле:

$$\mathcal{E} = (C_1 - C_2) \cdot T \cdot N_{\text{сп}} \cdot \varepsilon + C_3 - C_{\text{д}} - E_{\text{н}} \cdot K \quad (17.11)$$

где C_1, C_2 – приведённые затраты на автомобильные генераторы до и после внедрения разработанной методики, р./мес.;

T – количество месяцев, ед.;

$N_{\text{сп}}$ – среднесписочное количество автомобилей, ед.;

ε – относительная величина автомобильных генераторов в парке, у которых будет увеличен срок службы за счёт полного использования их ресурса;

C_3 – экономия от эксплуатации автомобилей за счёт своевременной замены автомобильных генераторов, р.;

$C_{\text{доп}}$ – эксплуатационные затраты на диагностирование автомобильных генераторов, р.

$E_{\text{н}}$ – нормативный коэффициент экономической эффективности капитальных вложений, $E_{\text{н}}=0,15$;

K – капитальные вложения на приобретение средств диагностирования, р.

Исходя из результатов исследований следует, что увеличение срока службы автомобильных генераторов за счёт полного использования их ресурса составляет примерно 15 – 25%, принимаем в расчётах значение 20%. Величину ε принимаем равной 0,40.

Расчёт экономической эффективности для автомобильных генераторов, установленных на автомобилях ВАЗ ФКУ «ЦХ и СО» УМВД России по Оренбургской области (г. Оренбург), приведен в таблице 17.2. Исходная информация для расчётов взята из отчётных данных в АТП.

Приведённые расчёты показали, что внедрение методики оценки и прогнозирования остаточного ресурса автомобильных генераторов на автотранспортном предприятии позволяет получить годовой экономический эффект 494 р. на один автомобиль.

Таблица 17.2 – Расчёт экономической эффективности внедрения методики оценки и прогнозирования остаточного ресурса автомобильных генераторов

Наименование показателей	Единица измерения	Обозначение показателей и формула расчёта	Показатели	
			до внедрения	после внедрения
1	2	3	4	5
Исходные данные				
Среднесписочное количество автомобилей	ед.	$N_{\text{сп}}$	100	100
Годовой пробег парка автомобилей	тыс. км	L_{Γ}	7911,4	7911,4
Среднесуточный пробег автомобиля	км	$l_{\text{сс}}$	255	255
Автомобиле-часы простоя из-за выхода из строя генератора	тыс. час	$\sum A \cdot r_{\text{п}}$	0,155	–
Периодичность диагностирования	тыс. км	$L_{\text{д}}$	–	105
Стоимость цифрового осциллографа	р.	K_1	–	41200
Стоимость ноутбука	р.	K_2	–	30000
Стоимость автомобильного генератора	р.	$S_{\text{ар}}$	4500	4500

Продолжение таблицы 17.2

1	2	3	4	5
Степень использования ресурса генератора	р.	Q	1,0	1,2
Средний срок службы генератора	мес.	$T_{\text{н}}$	60	60
Среднее время диагностирования генератора	мин	$t_{\text{д}}$	—	5,0
Среднее время замены генератора	мин	$t_{\text{з}}$	50,0	50,0
Часовая тарифная ставка автоэлектрика	р./час	$C_{\text{тс}}$	122,5	122,5
Средняя величина прибыли, которую получает АТП от эксплуатации одного автомобиля за 1 час	р./час	$\Pi_{\text{час}}$	1000	1000
Расчёт затрат				
Срок службы генератора	мес.	$T_{\text{ар}} = T_{\text{н}} \cdot Q$	60	72
Приведенные затраты на генераторы	р./мес.	$C_{\text{ар}} = \frac{S_{\text{ар}}}{T_{\text{ар}}}$	75	62,5
Количество диагностирований генераторов за год	ед.	$n = \frac{L_{\text{г}}}{L_{\text{д}}}$	—	75
Общая трудоёмкость диагностирований генераторов за год	чел.·час	$T_{\text{д}} = n \cdot t_{\text{д}}$	—	6,225
Затраты на заработную плату автоэлектрика	р.	$C_{\text{зп}} = 1,25 \cdot T_{\text{д}} \cdot C_{\text{тс}}$	—	953,2
Затраты на ТО и Р диагностической аппаратуры и вычислительной техники за год	р.	$C_{\text{ТО}} = 0,06 \cdot (K_1 + K_2)$	—	4272
Сумма амортизационных отчислений на восстановление аппаратуры	р.	$C_{\text{ам}} = 0,12 \cdot (K_1 + K_2)$	—	8544
Затраты на простой автомобилей при проведении диагностирования	р.	$C_{\text{пр1}} = t_{\text{д}} \cdot \Pi_{\text{час}} \cdot n$	—	6225
Затраты простой автомобилей при замене генераторов	р.	$C_{\text{пр2}} = t_{\text{з}} \cdot \Pi_{\text{час}} \cdot n$	62475	31237,5

Продолжение таблицы 17.2

1	2	3	4	5
Итого дополнительных затрат	р.	$C_{\text{доп}} = C_{\text{зп}} + C_{\text{ТО}} + C_{\text{ам}} + (C_{\text{пр1}} - C_{\text{пр2}})$	—	- 23693,3
Расчёт показателей эффективности				
Экономия затрат на автомобильные генераторы за год	р.	$\Delta C_{\text{ар}} = (C_{\text{ар1}} - C_{\text{ар2}}) \cdot T \cdot N_{\text{сп}} \cdot \varepsilon$	—	36250
Экономия от эксплуатации автомобилей за счёт своевременной замены автомобильных генераторов	р.	$C_{\text{э}} = \Pi_{\text{час}} \cdot \sum A \cdot r_{\text{п}}$	—	155
Годовой экономический эффект	р.	$\mathcal{E} = \Delta C_{\text{ар}} + C_{\text{э}} - C_{\text{доп}} - E_{\text{н}} \cdot (K_1 + K_2)$	—	49418,3
Удельная экономия на 1 автомобиль в год, р.	р.	$\mathcal{E}_{\text{уд}} = \mathcal{E} / N_{\text{сп}}$	—	494,2

§4 Выводы по главе

Величина наработки начала постоянного диагностирования, определённая при помощи экономико-вероятностного метода, составила 100 тыс. км пробега, а периодичность дальнейшего диагностирования, рассчитанная по заданному уровню вероятности безотказной работы – 29,04 тыс. км пробега. Скорректированные значения периодичности соответственно 105 и 30 тыс. км. пробега (7 лет и 2 года эксплуатации соответственно). Применение предлагаемого метода диагностирования, и разработанной на его основе методики оценки и прогнозирования остаточного ресурса позволит получить годовой экономический эффект 494 р. в расчёте на 1 автомобиль.

Заключение

Итогом выполненных исследований можно считать следующее:

- раскрыто воздействие климатических и эксплуатационных факторов на изменение технического состояния автомобильных генераторов, установлено что при оценке остаточного ресурса работы генераторов необходимо учитывать температуру окружающего воздуха, как основной фактор, характеризующий негативное воздействие окружающей среды;
- предложена классификация методов и средств диагностирования автомобильных генераторов, учитывающая измеряемые параметры, принципы измерения, способы определения, отличающаяся детализацией средств инструментального контроля наиболее характерных неисправностей;
- на основе причинно-следственных связей обоснован выбор диагностических и структурных параметров автомобильных генераторов, обладающих наибольшей чувствительностью и информативностью, и позволяющих контролировать техническое состояние генераторов без снятия с транспортного средства;
- развиты теоретические аспекты взаимосвязи структурных и диагностических параметров с техническим состоянием автомобильных генераторов; определено, что возникновение электрических неисправностей приводит к уменьшению среднего значения и росту размаха пульсации выходного напряжения;
- разработана математическая модель, устанавливающая зависимость интенсивности изменения ресурса автомобильных генераторов от температуры окружающего воздуха и наработки, учитывающая его техническое состояние на момент диагностирования и степень его

изменения под влиянием факторов условий эксплуатации на межсервисном пробеге;

- разработана методика определения взаимосвязи структурных и диагностических параметров автомобильных генераторов путем физического моделирования неисправностей, позволившая установить границы возникновения и развития неисправностей в значениях структурных и диагностических параметров;

- разработан экспресс-метод определения технического состояния генератора по параметру размаха пульсации выходного напряжения, позволяющий прогнозировать изменение технического состояния генератора под влиянием условий эксплуатации с достоверностью до 92%;

- разработана регрессионная модель, аппроксимирующая экспериментальные значения вариации температуры окружающего воздуха, как основного фактора, необходимого для прогнозирования остаточного ресурса автомобильных генераторов;

- разработаны алгоритм и программа оценки и прогнозирования остаточного ресурса автомобильных генераторов, в котором впервые учтена величина размаха пульсации выходного напряжения. Погрешность разработанной методики оценки и прогнозирования остаточного ресурса автомобильных генераторов, на интервале пробега, соответствующего техническому обслуживанию, не превышает 3,5%.

- определены величины наработки начала постоянного диагностирования, составившая 100 тыс. км пробега, а также периодичность дальнейшего диагностирования, рассчитанная по заданному уровню вероятности безотказной работы, составившая 29,04 тыс. км пробега;

- рассчитана экономическая эффективность предлагаемого метода диагностирования, и разработанной на его основе методики оценки и прогнозирования остаточного ресурса автомобильных генераторов. Годовой экономический эффект составил 494 р. в расчёте на 1 автомобиль.

Следует отметить, что в работе сделан акцент на определение технического состояния и прогнозирование остаточного ресурса генераторов по параметрам выходного напряжения, так как доказано их изменение с ростом наработки.

Исследование других диагностических параметров (температуры генератора, параметрам внешнего магнитного поля, вибрации и т. п.) будет продолжено с целью создания полной картины взаимосвязи технического состояния генератора с его диагностическими параметрами. Полученные результаты лягут в основу бортовой системы мониторинга системы электроснабжения транспортных средств.

Список использованных источников

1. Автомобили LADA 1117, 1118, 1119. Технология технического обслуживания и ремонта. Сборник технологических инструкций / А. В. Куликов, П. Н. Христов, В. Е. Климов, Д.А. Прудских, В. А. Зимин, В.С. Боюр, Т. Б. Беляева, В.Б. Гирко, Г.А. Хлыненко, В. А. Шмелева. – Тольятти, 2006. – 220 с.
2. Автомобили LADA 1117, 1118, 1119. Трудоёмкости работ (услуг) по техническому обслуживанию и ремонту / А. В. Куликов, П. Н. Христов, В. Е. Климов, В.С. Боюр, В.В. Рева, Д.А. Прудских, В.Б. Гирко, В. А. Зимин, Г.А. Хлыненко, М. В. Васильев, Р.Д. Фахрутдинов. – Тольятти, 2006. – 146 с.
3. Автомобили ВАЗ. Электрооборудование. Технология технического обслуживания и ремонта / В. Л. Смирнов, Ю. С. Прохоров, В. Л. Костенков, В.С. Боюр, В. А. Зимин, А.В. Капранов. – Н. Новгород: АТИС, 2002. – 96 с.
4. Акимов, А.В. Генераторы зарубежных автомобилей / А. В. Акимов, С. В. Акимов, Л. П. Лейкин, под общ. ред. проф. С. В. Акимова. – 2-е изд., пер. и доп. – М.: ЗАО «КЖИ «За рулем», 2003. – 128 с.
5. Аринин, И.Н. Диагностирование технического состояния автомобиля / И. Н. Аринин. – М.: Транспорт, 1978. – 176 с.
6. Архирейский, А.А. Статистическая обработка данных о надёжности / А.А. Архирейский, Е.Н. Рассоха. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2004. – 35 с.
7. Бакуревич, Ю.Л. Эксплуатация автомобилей на Севере / Ю.Л. Бакуревич, С. С. Толкачев, Ф. Н. Шевелев. – М.: Изд-во «Транспорт», 1973. – 180 с.
8. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. – М.: Издательский центр «Академия», 2003. – 576 с.

9. Гольдберг, О.Д. Надёжность электрических машин: учебник для студ. высш. учеб. заведений / О. Д. Гольдберг, С.Н. Хелемская; под ред. О. Д. Гольдберга. – М.: Издательский центр «Академия», 2010. – 288 с.
10. Гриценко, А.В. Диагностирование автомобильных генераторов по осциллограммам напряжения / А. В. Гриценко, С. С. Куков // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2010. – №2. – С. 13-15.
11. Двадненко, В.Я. Устройство встроенного контроля ременной передачи автомобильного генератора / В.Я. Двадненко // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2015. – Т. 3. № 5-3 (16-3). – С. 23-27.
12. Девятков, В.Д. Прогнозирование ресурса контактно-щёточных узлов капитально отремонтированных генераторов мобильных сельскохозяйственных машин: дис. ... канд. техн. наук / В. Д. Девятков. – Челябинск, 2003. – 159 с.
13. Денисов, И.В. Исследование надёжности генераторной установки автомобиля "ЛАДА КАЛИНА" в гарантийный период эксплуатации / И. В. Денисов, А. А. Смирнов // Бюллетень транспортной информации. – 2017. – №6 (264). – С. 19-22.
14. Денисов, И.В. Надёжность электрооборудования автомобиля LADA KALINA в гарантийный период эксплуатации / И. В. Денисов, А. А. Смирнов // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2018. – №1. – С. 44-47.
15. Евдокимов, Д.В. Аналоговый регулятор напряжения для генераторных установок автомобилей: дис. ... канд. техн. наук / Д. В. Евдокимов. – Москва, 2010. – 120 с.
16. Завадский, Ю.В. Решение задач автомобильного транспорта и дорожно-строительных машин с помощью регрессионно-

корреляционного анализа / Ю. В. Завадский. – Москва, МАДИ, 1981. – 116 с.

17. Заятров, А.В. Исследование эксплуатационной надёжности современных легковых автомобилей / А.В. Заятров, В. Н. Козловский // Грузовик. – 2011. – №10. – С. 39-42.

18. Калиткин, Н.Н. Численные методы / Н.Н. Калиткин; под ред. А.А. Самарского. – 2-е изд. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2011. – 586 с.

19. Козловский, В.Н. Метод обеспечения качества автомобильной генераторной установки при проектировании и производстве: дис. ... канд. техн. наук / В. Н. Козловский. – Москва, 2005. – 204 с.

20. Козловский, В.Н. Обеспечение качества и надёжности системы электрооборудования автомобилей: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / В. Н. Козловский. – Тольятти, 2010. – 41 с.

21. Коратаев, К.Э. Обоснование рациональных параметров и режимов работы генераторных установок для сельскохозяйственных машин: дис. ... канд. техн. наук / К.Э. Коратаев. – Барнаул, 2004. – 198 с.

22. Кох, П.И. Климат и надёжность машин / П. И. Кох. – М.: Машиностроение, 1981. – 175 с.

23. Кричевский, Ю.И. Влияние климата на надёжность машин и механизмов / Ю. И. Кричевский. – Минск, Наука и техника, 1968. – 92 с.

24. Кузнецов, Н.Л. Надёжность электрических машин: учеб. пособие для вузов / Н. Л. Кузнецов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 432 с.

25. Кухарчук, В.В. Исследование и выбор диагностических параметров автомобильных генераторных установок: автореф. дис. ...канд. техн. наук / В.В Кухарчук. – Москва, 2002. – 23 с.

26. Лабезников, М.Г. Эксплуатация автомобилей в условиях жаркого климата и пустынно-песчаной местности / М.Г. Лабезников, Ю.Л. Бакуревич. – М.: Изд-во «Транспорт», 1969. – 116 с.

27. Малкин, В.С. Техническая диагностика: учебное пособие / В. С. Малкин. – Санкт-Петербург: Лань, 2013. – 268 с.
28. Мигаль, В.Д. Методы технической диагностики автомобилей: учебное пособие / В.Д. Мигаль, В.П. Мигаль. – М.: ИД ФОРУМ: НИЦ ИНФРА-М, 2014. – 416 с.
29. Мирошников, Л.В. Диагностирование технического состояния автомобилей на автотранспортных предприятиях / Л. В. Мирошников, А. П. Болдин, В.И. Пал. – М.: Транспорт, 1977. – 264 с.
30. Михлин, В.М. Прогнозирование технического состояния машин / В.М. Михлин. – М.: Колос, 1976. – 287 с.
31. Мухаметшина, Р.М. Влияние климатических факторов на свойства материалов и надёжность дорожно-строительных машин / Р.М. Мухаметшина // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2014. – №4(30). – С. 490-496.
32. Набоких, В.А. Диагностика электрооборудования автомобилей и тракторов: учебное пособие / В.А. Набоких – М.: ФОРУМ; НИЦ ИНФРА, 2013. – 288 с.
33. Набоких, В.А. Испытания электрооборудования автомобилей и тракторов: Учебник для студентов высш. учеб. заведений / В.А. Набоких. – М.: Издательский центр «Академия», 2003. – 256 с.
34. Пат. 2077064 Российская Федерация, МПК G01R 31/34, H02K 15/00. Способ диагностирования генераторов переменного тока и устройства для его осуществления / Рогачев В. Д., Трифионов С. М.; заявитель и патентообладатель Рязанское высшее военное автомобильное инженерное училище. – № 93027592/07; заявл. 14.05.93; опубл. 10.04.97 – 7 с.
35. Пат. 2422840 Российская Федерация, G 01R 31/02. Способ диагностирования изделий автомобильного электрооборудования / Шлегель О. А., Северин А.А., Пьянов М. А.; заявитель и

патентообладатель Поволжский государственный университет сервиса. – № 2008149192/28; заявл. 12.12.08; опубл. 27.06.11, Бюл. №18. – 5 с.

36. Пат. 2692403 Российская Федерация, МПК G01R 31/34, G01M 15/00, H02P 9/30. Способ определения неисправностей автомобильных вентильных генераторов / Пузаков А.В.; заявитель и патентообладатель Оренбург. гос. ун-т. – №2018136687; заявл. 17.10.18; опубл. 24.06.19, Бюл. №18. – 10 с.

37. Резник, Л.Г. Эффективность использования автомобилей в различных условиях эксплуатации / Л. Г. Резник, Г.М. Ромалис, С.Т. Чарков. – М.: Транспорт, 1989. – 128 с.

38. Румшинский, Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента / Л.З. Румшинский. – М.: Наука, 1971. –192 с.

39. Сборник технологических инструкций. Автомобиль LADA GRANTA и его модификации. Технология технического обслуживания и ремонта. / П. Н. Христов, Д.А. Прудских, В.В. Рева, В. А. Зимин, Ю. В. Князев, М.А. Пантюшин, С. Н. Самохин, В. А. Шмелева. – Тольятти, 2012. – 376 с.

40. Селихов, А.В. Повышение эффективности диагностирования технического состояния электрогенератора автомобиля электрорезистивным методом: дис. ... канд. техн. наук. / А. В. Селихов. – Орел, 2017. – 274 с.

41. Сергеев, А.Г. Диагностирование электрооборудования автомобилей / А. Г. Сергеев, В.Е. Ютт. – М.: Транспорт, 1987. – 157 с.

42. Сидорин, Е.С. Совершенствование организации технического обслуживания элементов системы электрооборудования легковых автомобилей: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.10 / Е. С. Сидорин. – Оренбург, 2015. – 148 с.

43. Соколов, Л.А. Совершенствование изделий автотракторного электрооборудования по результатам диагностирования дефектов в

процессе производства и эксплуатации: дис. ... канд. техн. наук / Л. А. Соколов. – М., 2010. – 108 с.

44. Техническая эксплуатация автомобилей: учеб. для вузов / под ред. Е. С. Кузнецова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 2004. – 535 с.

45. Токарев, А.Н. Основы теории надёжности и диагностика: Учебник для студентов автотранспортных специальностей. / А. Н. Токарев. – Барнаул: Изд. АлтГТУ, 2008. – 168 с.

46. Тонких, В.Г. Метод диагностики асинхронных электродвигателей в сельском хозяйстве на основе анализа параметров их внешнего магнитного поля: дис. ... канд. техн. наук / В. Г. Тонких. – Барнаул, 2009. – 166 с.

47. Федотов, А.И. Технология и организация диагностики при сервисном сопровождении: учебник для студ. учреждений высш. образования / А. И. Федотов. – М.: Издательский центр «Академия», 2015. – 352 с.

48. Фесенко, М.Н. Теория, конструкция и расчет автотракторного электрооборудования: / М. Н. Фесенко, Л. В. Копылова, В. И. Коротков и др. – М.: Машиностроение, 1992. – 382 с.

49. Харазов, А.М. Диагностическое обеспечение технического обслуживания и ремонта автомобилей: [Справ. пособие для ПТУ] / А.М. Харазов. – М.: Высш. шк., 1990. – 205 с.

50. Харазов, А.М. Методы оптимизации в технической диагностике машин / А.М. Харазов, С.Ф. Цвид. – М.: Машиностроение, 1983. – 132 с.

51. Хасанов, И.Х. Обоснование периодичности технического обслуживания передних подвесок переднеприводных автомобилей: дис. ... канд. техн. наук. / И. Х. Хасанов. – Оренбург, 2008. – 169 с.

52. Хомутов, О.И. Параметры теплового режима асинхронного электродвигателя для прогнозирования остаточного ресурса работы / О.И.

Хомутов, С.О. Хомутов, В.И. Сташко, А. А. Грибанов // Ползуновский вестник. – 2004. – №1. – С. 279-284.

53. Чооду, О.А. Разработка методики оценки влияния климатических условий на эксплуатацию дорожно-строительных машин: дис. ... канд. техн. наук / О.А. Чооду. – СПб., 2009. – 128 с.

54. Шлегель, А.О. Повышение надёжности электромеханической системы автомобильного генератора: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. О. Шлегель. – Самара, 2006. – 20 с.

55. Эль-Сагир, М. Обеспечение безотказности систем электроснабжения автомобилей в условиях жаркого климата (на примере Иордании): дис. ... канд. техн. наук / М. Эль-Сагир. – Москва, 2000. – 154 с.

56. Ayers, CW. (1998). Electrical signature analysis for automotive alternator diagnostics. *Machinery Failure Prevention Technology Conference Vol. 32*. pp. 20-25.

57. Bayba, A. J., Siegel, D.N. and Tom, K. (2012) Techniques for the Health Assessment of Automotive Alternators. Adelphi, MD 20783-1197, 46 p.

58. Cheng, S. and Habetler, T.G. (2011) An analysis and discussion of the voltage and current spectrum of claw-pole alternators for fault detection purposes. *8th IEEE Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics & Drives, Bologna, 2011*, pp. 606-611.

59. Choi, J.-W. (2006) *Analysis of electrical signatures in synchronous generators characterized by bearing faults*. Thesis MSc, Texas A&M University.

60. Dziubiński, M. (2002). Modelling and simulation of diagnosis of the car alternator. *Postępy Napędu Elektrycznego i Energoelektroniki. Lublin, 2002*. pp. 129-144.

61. Dziubiński, M. (2003) Computer tests of alternator reliability. *8th International DAAAM Workshop - CA Systems and Technologies Integration and Intelligence of CA Systems At: Žylina, Slovakia, 2003*. pp. 87-94.
62. Farfan-Ramos, L. (2009) *Real-time fault diagnosis of automotive electrical power generation and storage system*. M.Sc. Thesis. Wright State University.
63. Hashemi, A.B. and Pisu, P. (2011). Fault Diagnosis in Automotive Alternator System Utilizing Adaptive Threshold Method. *Proceedings of the Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society 2011, PHM 2011*.
64. Kodali, A., Zhang, Y., Sankavaram, C., Pattipati, K. and Salman, M. (2013). Fault Diagnosis in the Automotive Electric Power Generation and Storage System (EPGS). In *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 18, no. 6, pp. 1809-1818,
65. Moyes, A., Burt, G.M., McDonald, J., Capener, J.R., Dray, J. and Goodfellow, R. (1995) The application of expert systems to fault diagnosis in alternators. In *Proc. 7th Int. Conf. Electr. Mach. Drives*, 1995. pp. 171–175.
66. Mürken, M., Kübel, D., Kurz, A., Thanheiser, A. and Gratzfeld, P. (2018) Fault analysis of automotive claw pole alternator rectifier diodes. *Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles. Nottingham, 2018*. pp. 1-6.
67. Parkash, V., Kumar, D., Kumar, C. and Rajoria, R. (2013) Failure Mode and Effect Analysis of Automotive Charging System. *International journal of software & hardware research in engineering Vol. 1 Issue 3 November 2013*, pp. 53-57.
68. Patent DE102012221936A1 Germany H01M 10/48 Diagnostic device for e.g. power generator mounted in motor vehicle, has monitoring device that monitors malfunctioning of power source by comparing voltage waveform and/or current path with reference waveform and/or current path;

Siegbert Steinlechner. / Robert Bosch GmbH, Filed: 30.11.12; Published: 05.06.14

69. **Patent JP3833600B2** Japan G01R 31/343 Alternator failure determination apparatus for a vehicle; 崇 前田俊憲 松井隆徳 松永宏司 藤岡
Filed: 08.10.02; Published: 28.07.06, 18 p.

70. **Patent US20110022261A1** United States G01R 31/007 Method for detecting an electrical fault in an electrical network of a motor vehicle; Begir Pushkolli, Ulrich Klein. / Robert Bosch GmbH. Appl. No.: 12/808879; Filed: 11.11.08; Published: 27.01.11, 7 p.

71. **Patent US3629704A** United States G01R 31/006 Automotive electrical system test apparatus; Carlile R Stevens. Appl. No.: 685456; Filed: 24.11.67; Published: 21.12.71, 9 p.

72. **Patent US3893029A** United States G01R 31/006 Automobile alternator tester; Richard R Vensel, Jerry A Leach. Appl. No.: 454125; Filed: 25.03.74; Published: 01.07.75, 4 p.

73. **Patent US4019120A** United States H02J 7/166 Fault indicator for motor vehicle battery charging systems; Gerald T. Fattic. / Motors Liquidation Co. Appl. No.: 672872; Filed: 02.04.76; Published: 19.04.77, 8 p.

74. **Patent US4156845A** United States G01R 31/40 Apparatus for identifying faulty diodes in automotive alternators; Frank J. Muellner, Richard G. Volk. / K-D Manufacturing Company. Appl. No.: 803677; Filed: 06.06.77; Published: 29.05.79, 8 p.

75. **Patent US4178546A** United States G01R 31/006 Alternator test apparatus and method; Leonard R. Hulls, Toy Dowdell, Jr. / RCA Corporation, New York, N.Y. Appl. No.: 867510; Filed: 06.01.78; Published: 11.12.79, 4 p.

76. **Patent US4315204A** United States G01R 31/007 Ripple detector for automotive alternator battery charging systems; Kirk A. Sievers, Robert W. Mortonson / Motorola, Inc., Appl. No.: 152223; Filed: 22.05.80; Published: 09.02.82, 31 p.

77. **Patent US4379990A** United States H02J 7/1461 Fault detection and diagnostic system for automotive battery charging systems; Kirk A. Sievers, Robert W. Mortonson. / Prestolite Electric Inc. Appl. No.: 152,225; Filed: 22.05.80; Published: 12.04.83, 32 p.
78. **Patent US5252926A** United States H02J 7/1461 Apparatus and method for distinguishing between faults due to alternator failure and interruption of stator phase signals in automotive battery charging systems; Paolo Menegoli. / SGS Thomson Microelectronics Inc. Appl. No.: 876878; Filed: 30.04.92; Published: 12.10.93, 10 p.
79. **Patent US6363303B1** United States H02J 7/1461 Alternator diagnostic system; Kevin I. Bertness. / Midtronics, Inc., Appl. No.: 09/431446; Filed: 01.11.99; Published: 26.03.02, 12 p.
80. **Patent US6806727B2** United States G01R 31/343 Alternator testing method and system using ripple detection; Dennis G. Thibedeau, Richard J. Faehnrich, Alejandro P. Brott, Alan D. Goetzelmann, Paul A. Willems. / Snap-On Incorporated. Appl. No.: 09/888,385; Filed: 26.06.01; Published: 19.10.04, 13 p.
81. **Patent US6862504B2** United States G01R 31/007 System and method for detecting alternator condition; Marv M. Hamdan, Gusztav Holler, Kenneth A. Grolle, Joseph M. Macnamara, Kirit A. Thakkar. / Bendix Commercial Vehicle Systems LLC. Appl. No.: 10/238543; Filed: 10.09.02; Published: 01.05.05, 6 p.
82. **Patent US7246015B2** United States G01R 31/007 Alternator tester; Kevin I. Bertness, Alan Keith Melton. / Midtronics, Inc. Appl. No.: 10/864904; Filed: 09.06.04; Published: 17.07.07, 28 p.
83. **Patent US9431941B1** United States H02P 9/006 Method and apparatus for detecting alternator rectifier diode short fault; Rajeev Verma, Bret Dwayne Worden. / General Electric Company. Appl. No.: 14/620218; Filed: 12.02.15; Published: 30.08.16, 11 p.

84. Pillai, K.P., Idiculla, M.K. and Nair, A.S. (2006). Spectral Study on The Voltage Waveform of Claw Pole Automotive Alternator. 10.7148/2006-0456.
85. Scacchioli, A., Rizzoni, G., Salman, M. A., Li, W., Onori, S. and Zhang, X., (2014) Model-based Diagnosis of an Automotive Electric Power Generation and Storage System. *In IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, vol. 44, no. 1, Jan. 2014. pp. 72-85.
86. Styla, S., Wróbel K. and Boguta A. (2013) Alternator diagnostics by means of an oscilloscope and infrared radiation – comparison of methods. *Teka. Commission of motorization and energetics in agriculture*, Vol. 13, No. 1, pp. 185–190
87. Walusiak, S., Dziubiński, M. and Białczak, J. (1999) The simulation of alternator defects for elevated work voltage. *Konstrukcja, Badania, Eksploatacja, Technologia Pojazdów Samochodowych i Silników Spalinowych*. 18. pp. 442-448.
88. Zhang, Y., Rajagopalan, S. and Salman, M. (2010) A practical approach for belt slip detection in automotive electric power generation and storage system. *In Aerosp. Conf., Big Sky, MT, Mar. 6–13, 2010*.

Приложение А

(обязательное)

Характеристика диагностических параметров

Чувствительность диагностического параметра оценивается коэффициентом чувствительности:

$$K = \frac{\Delta U}{\Delta r} = \frac{3,5}{6} = 0,58 \text{ В/Ом} .$$

Стабильность диагностического параметра:

$$\sigma = \sqrt{\frac{5,728}{23-1}} = 0,48 .$$

Информативность диагностического параметра:

$$K_I = \frac{\overline{S_2} - \overline{S_1}}{\sigma_1 + \sigma_2} = \frac{12,65 - 4,37}{1,407 + 2,539} = 2,09 .$$

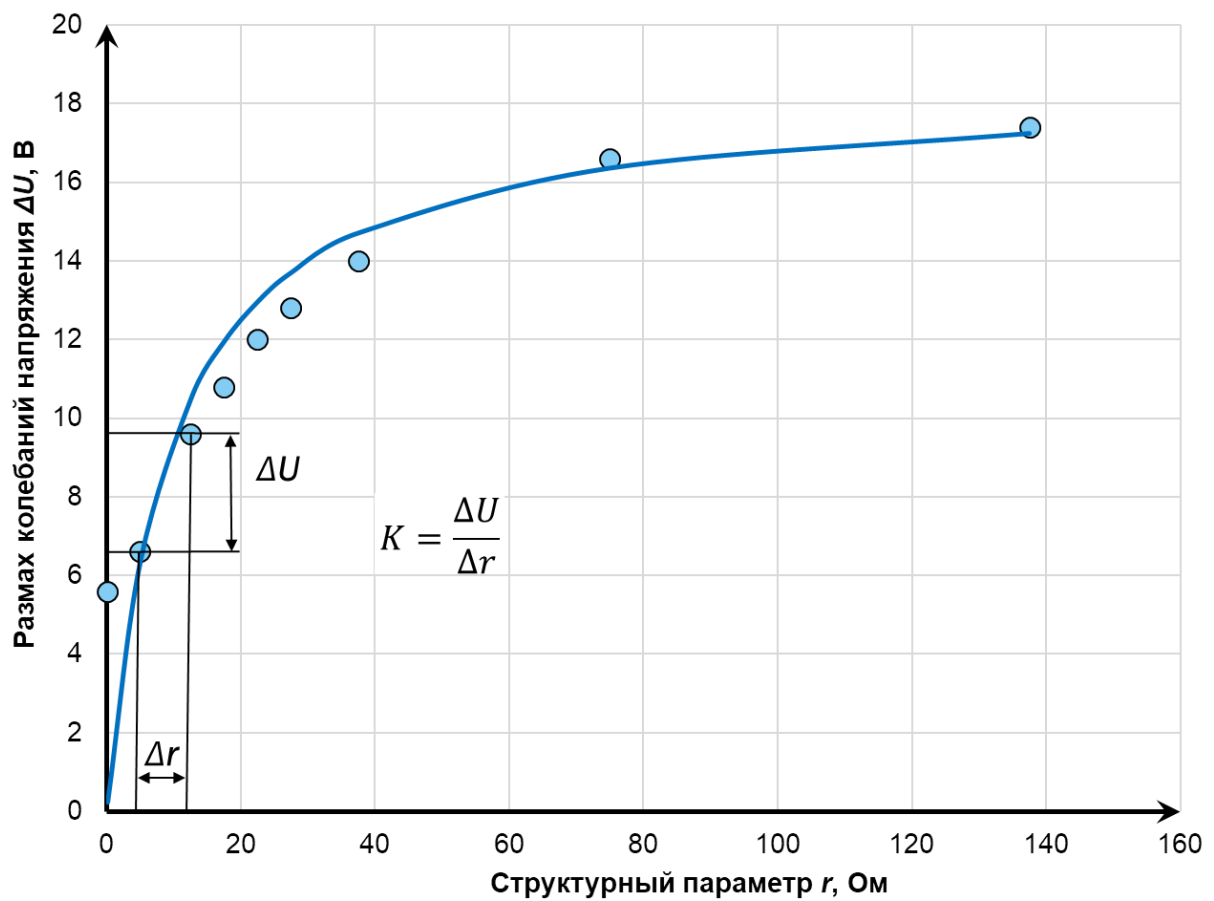


Рисунок А.1 – Чувствительность и однозначность диагностического параметра

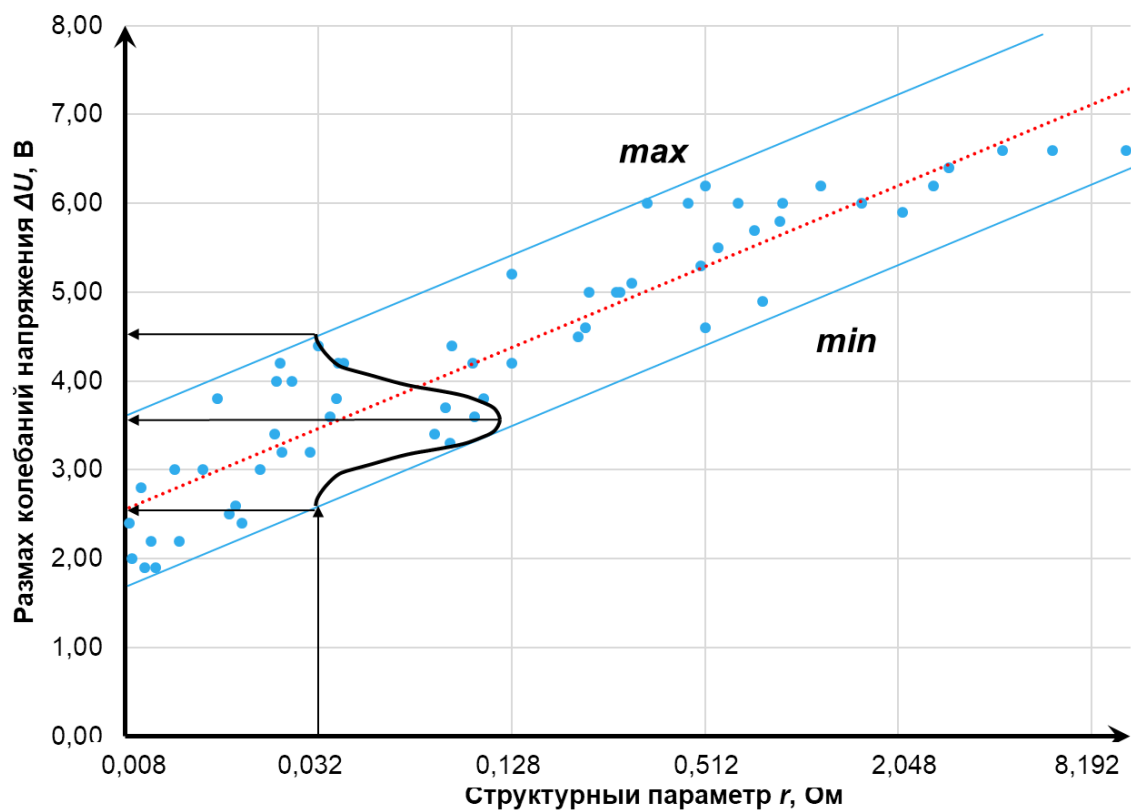
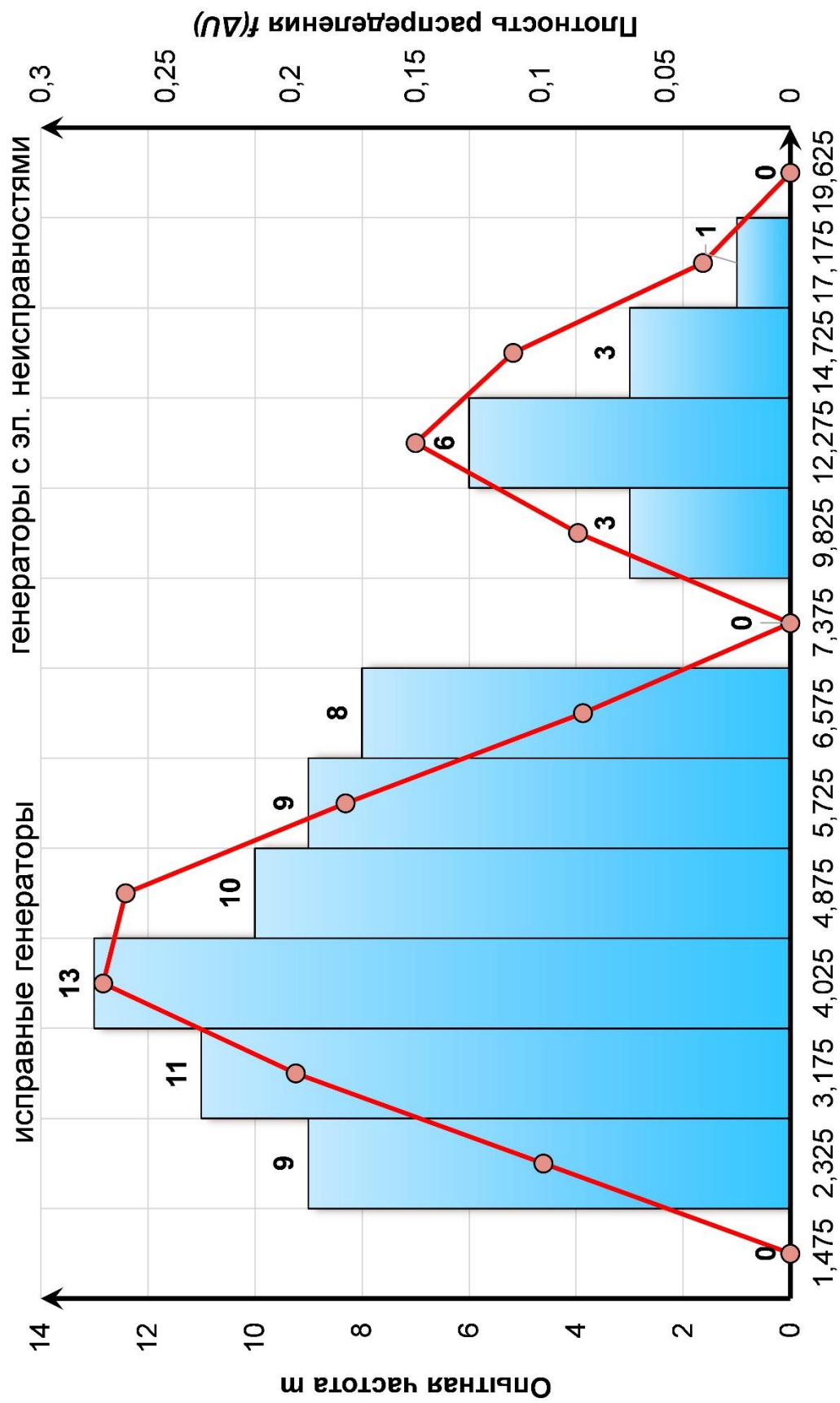


Рисунок А.2 – Стабильность диагностического параметра



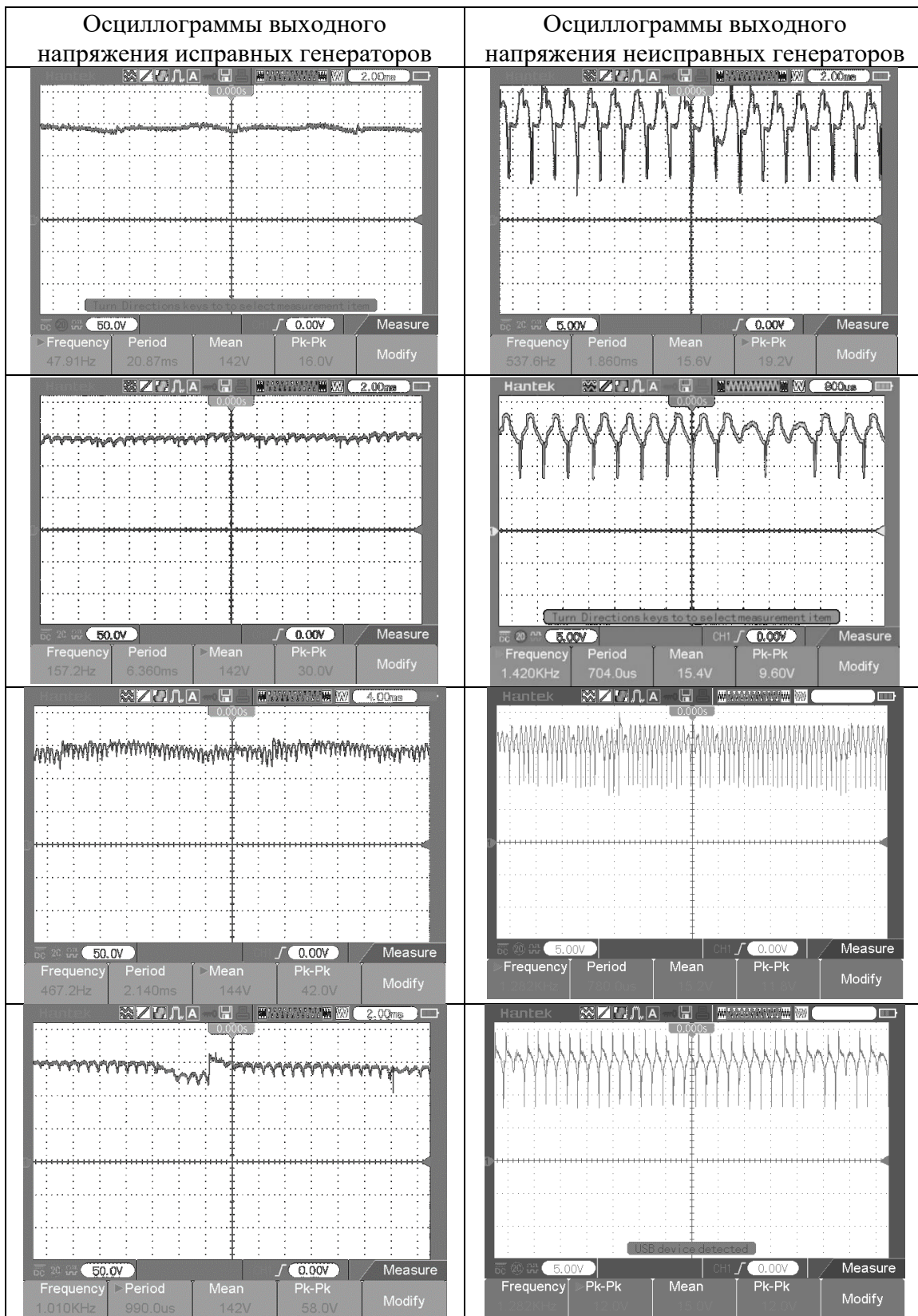
Размах колебаний напряжения ΔU , В

Рисунок А.3 – Информативность диагностического параметра

Приложение Б

(справочное)

Осциллограммы выходного напряжения



Приложение В

(обязательное)

Статистические характеристики распределения диагностического параметра

Диагностический параметр колебаний выходного напряжения исправных автомобильных генераторов представляет собой случайную величину. В результате наблюдения были получены 60 значений размаха колебаний выходного напряжения, приведённые в таблице В.1.

Оценка математического ожидания:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 4,37 \text{ В} . \quad (\text{В.1})$$

Оценка дисперсии:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2 = 1,98 \text{ В} . \quad (\text{В.2})$$

Среднее квадратическое отклонение:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2} = 1,407 \text{ В} . \quad (\text{В.3})$$

Коэффициент вариации:

$$v = \frac{\sigma}{\bar{X}} = 0,322 . \quad (\text{В.4})$$

Принимаем число интервалов, рассчитанное по формуле Стенжера $k=6$, ширина интервала $\Delta x = X_{\max} - X_{\min} / 6 = 7,0 - 1,9 / 6 = 0,85$.

$$k \leq 1 + 3,31 \lg n, \quad (\text{B.5})$$

где n – объем выборки.

$$k \leq 1 + 3,31 \lg 60 = 1 + 5,96 = 6,96$$

С помощью критерия Пирсона определим соответствие данных нормальному закону.

Расчёты удобно проводить с помощью таблицы В.1.

$$\bar{X}_j = x_{\min} + \Delta x(j + 0,5), \quad (\text{B.6})$$

где $x_{\min}$ – наименьшее значение из данных наблюдений;

Δx – величина интервала;

j – номер интервала ($j = 0, 1, 2, \dots k-1$);

k – количество интервалов группирования.

В случае, когда значения параметров распределения определены, эмпирические частоты попадания исходных данных в интервал m_j сопоставляются с частотами, вычисленными по теоретическому уравнению плотности распределения вероятностей m'_j , вычисляемые по формуле:

$$m'_j = n \cdot f_j, \quad (\text{B.7})$$

где n - объем выборки;

f_j - плотность распределения вероятностей, вычисленная по теоретическому уравнению плотности распределения принятого закона для середины каждого интервала.

$$\chi^2 = \sum_{j=1}^r \frac{(m_j - m'_j)^2}{m'_j}; \quad (\text{B.8})$$

где k – число степеней свободы.

У нормального закона распределения два параметра ($p = 2$), значит число наложенных связей $s = 3$, число степеней свободы $k = 3$.

Таблица В.1 – Расчёт значения χ^2

Номер интервала j	Середина интервала X_j	Теоретическое значение функции плотности распределения вероятности $f(X_j)$	Теоретическая частота m_j'	Опытная частота m_j	χ^2
1	2,325	0,0988	6,224	9	1,238
2	3,175	0,198	12,474	11	0,174
3	4,025	0,275	17,325	13	1,08
4	4,875	0,266	16,758	10	2,725
5	5,725	0,178	11,214	9	0,437
6	6,575	0,083	5,229	8	1,468
					7,122

Если $\chi^2_{\text{набл}} < \chi^2_{\text{кр}}$ – нет оснований отвергнуть гипотезу о нормальном распределении генеральной совокупности. Другими словами, эмпирические и теоретические частоты различаются незначительно (случайно).

По таблице критических точек распределения χ^2 [8], по уровню значимости $\alpha = 0,05$ и числу степеней свободы $k = 3$ находим критическую точку правосторонней критической области.

Гипотеза о принадлежности опытных данных нормальному закону не отвергается, поскольку $\chi^2_{\text{набл}} = 7,122 < \chi^2_{\text{кр}}(0,05; 6) = 7,8$

Приложение Г

(справочное)

Среднемесячная температура в г. Оренбурге

Таблица Г.1 – Среднемесячная температура в г. Оренбурге

Год	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Итого за год
2010	-18,63	-14,98	-5,37	7,65	18,51	24,69	26,37	24,85	15,52	4,66	2,07	-4,96	6,7
2011	-13,77	-16,9	-6,78	7,31	15,91	19,08	25,82	20,21	14,58	6,39	-6,62	-11,71	4,46
2012	-12,18	-16,02	-5,56	15	19	23,7	24,78	24,4	14,05	8,2	0,68	-11,82	7,02
2013	-12,23	-10,23	-3,19	10,64	16,18	22,03	22,43	20,56	13,45	6,16	2,3	-7,88	6,68
2014	-13,91	-15,7	-3,45	13,95	20,47	19,58	18,21	22,74	13,48	3,72	-7,89	-9,31	5,16
2015	-22,04	-11,3	-4,1	16,17	21,55	28,22	22,08	15,11	15,78	3,98	-2,06	-3,95	6,62
2016	-12,01	-3,76	-1	13,25	18,77	19,75	22,72	26,07	13,22	4,16	-4,61	-12,75	6,98
2017	-10,82	-11,58	-4,84	7,34	14,38	18,36	22,78	23,01	14,56	5,3	1,58	-7,99	6,01
2018	-13,7	-11,51	-5,65	8,16	15,45	20,59	24,67	19,12	14,21	7,05	-2,13	-13,19	5,26

Приложение Д

(обязательное)

Определение предельных и предельно-допустимых значений диагностического параметра

Определим предельно-допустимые значения $S_{пр}$ диагностического параметра на основе выделения толерантных границ по формуле:

$$S_{пр} = \bar{S} + K \cdot \sqrt{\bar{D}} = 4,37 + 1,7 \cdot 1,98 = 7,74 \text{ В}$$

Пример определения предельных и предельно-допустимых значений размаха пульсации выходного напряжения на основе результатов экспериментальных исследований представлен на рисунке Д.1. Аналогично определяются значения для других неисправностей (таблица Д.1).

На основании полученных значений принимаем в качестве предельного значения параметра максимальное значений из полученных ($S_{пр}=18,4 \text{ В}$), а в качестве предельно-допустимого – минимальное значение ($S_{доп}=7,4 \text{ В}$).

Таблица Д.1 – Определение нормативных значений диагностических параметров

Характерная неисправность	Предельное значение $S_{пр}$, В	Предельно-допустимое значение $S_{доп}$, В
Обрыв диода	18,4	13,5
Короткое замыкание диода	12,4	10,0
Межфазное замыкание	15,4	7,4
Обрыв фазы статора	17,4	8,1
Межвитковое замыкание фазы статора	10,0	9,2
Замыкание фазы на корпус	8,8	7,4

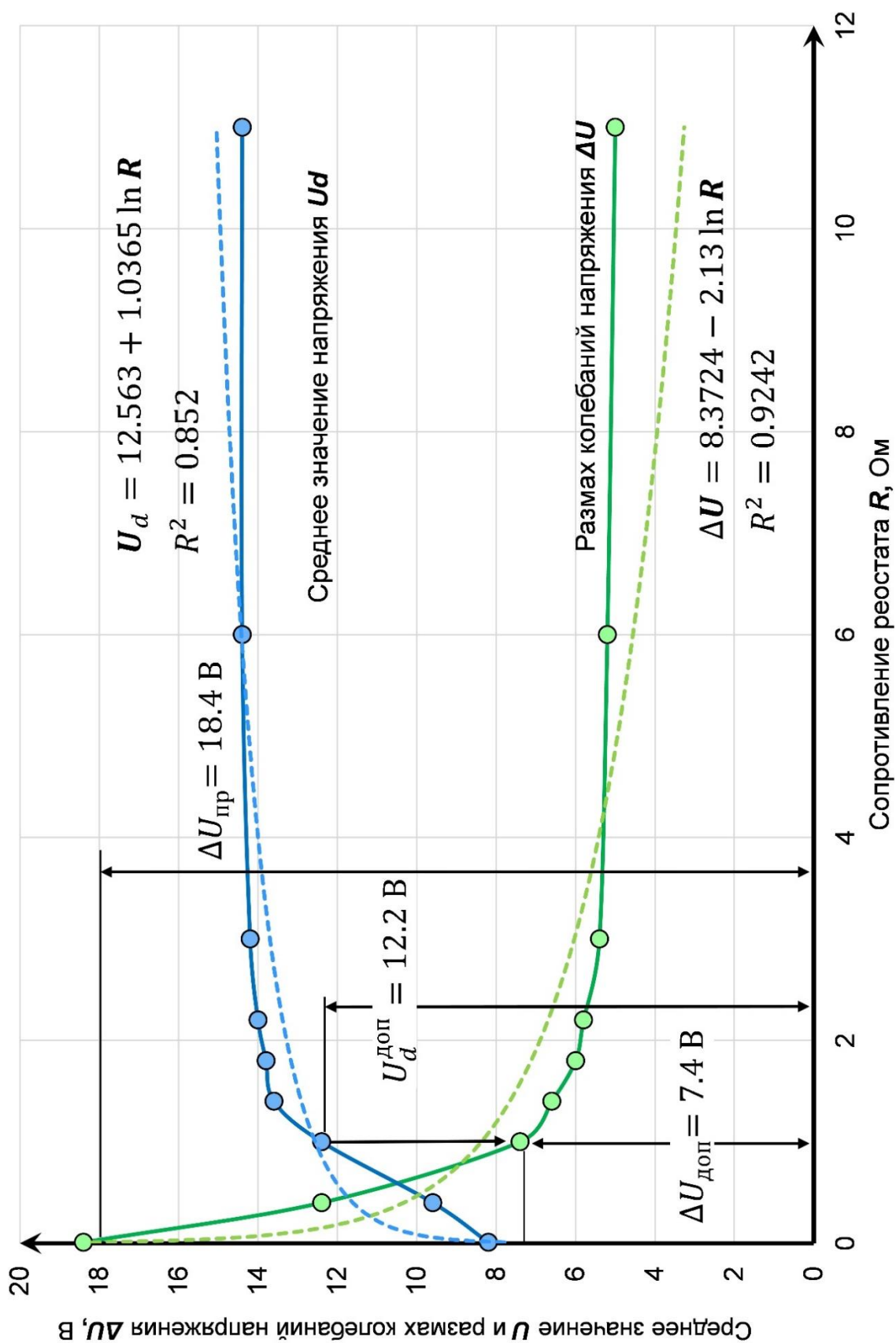


Рисунок Д.1.1 – Изменение диагностических параметров на примере межфазного замыкания