

*На правах рукописи*



**Подгорний Александр Сергеевич**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ  
ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ БОРТОВОГО  
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА АВТОМОБИЛЕЙ К  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ**

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

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

Самара 2019

Работа выполнена на кафедре «Теоретическая и общая электротехника» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет».

Научный руководитель: **Козловский Владимир Николаевич**  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», заведующий кафедрой «Теоретическая и общая электротехника»

Официальные оппоненты: **Ютт Владимир Евсеевич**  
заслуженный деятель науки и техники РФ, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)», заведующий кафедрой «Электротехника и электрооборудование»

**Доманов Виктор Иванович**  
кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет», заведующий кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет», г. Тольятти

Защита диссертации состоится 25 декабря 2019 г. в 12-00 час. на заседании диссертационного совета Д 212.217.04 при Самарском государственном техническом университете (СамГТУ) по адресу: г. Самара, ул. Первомайская, д. 18, корпус № 1, ауд. 4а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Самарского государственного технического университета по адресу: г. Самара, ул. Первомайская, 18, корпус 1.

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенных печатью) просим направлять по адресу: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, СамГТУ, главный корпус, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.217.04; факс: (846) 278-44-00, e-mail: a-ezhova@yandex.ru.

Автореферат разослан «  » \_\_\_\_\_ 201   г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д 212.217.04



Е.В. Стрижакова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы.**

Основные тенденции развития мирового автопрома, непосредственно связаны с ростом значимости бортового электротехнического комплекса. В полной мере, это характеризует как развитие конструкций традиционных автотранспортных средств (АТС), так и электромобилей (ЭМБ) и автомобилей с комбинированной энергоустановкой (АКЭУ). В настоящее время во всем мире эксплуатируется более одного миллиарда АТС, и их количество непрерывно растет. Автопроизводители совершенствуют свою продукцию улучшая управляемость, комфорт и экологичность. Во многом это достигается за счет применения в АТС сложных бортовых электротехнических систем (ЭТС), которые образуют комплекс. Активное насыщение бортового электротехнического комплекса (БЭК) новыми элементами порождает проблемы, связанные с необходимостью обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС). Статистические данные показывают, что существенную долю отказов (до 35 – 40%) в эксплуатации современных АТС составляют элементы электротехнического комплекса. При этом значительную часть отказов, в полной мере, на предмет вскрытия коренных причин, идентифицировать не удается. Причиной такого положения является недостаточный уровень исследованности вопросов взаимного влияния электрокомпонентов друг на друга в процессе эксплуатации АТС, а также влияния электромагнитных помех (ЭМП) на эффективность работы БЭК АТС.

С одной стороны, в АТС реализуется сложная архитектура электрооборудования. Схемотехника строится на базе микропроцессорной техники. Для управления процессами применяется специализированное программное обеспечение. С другой, кроме электромагнитных воздействий естественного происхождения, ухудшается внешняя техногенная электромагнитная обстановка, за счет увеличения общего количества радиопередающих систем и источников промышленных радиопомех. Совокупность всех этих факторов и приводит к увеличению потенциальных проблем ЭМС.

Воздействуя на БЭК автомобиля, электромагнитные помехи могут вызывать у него нарушения работоспособности различного характера, в том числе и опасные для эксплуатации. Вышеизложенное показывает, что проблема ЭМС бортового электротехнического комплекса АТС является актуальной. В данной области постоянно ведутся научные исследования. Их результаты освещаются в тематических изданиях и обсуждаются на конференциях. Большой вклад в решение проблем внесли отечественные и зарубежные ученые: А. Д. Князев, Л.Н. Кечиев, Н.В. Балюк, Н.А. Володина, В.Е. Ютг, С.И. Комягин, П.А. Николаев, Backstrom M., T. Rybak, Ott H.W., H. Rakouth, Chun-Chih Lin., Joungho Kim, C. Cammin, M. Steffka, L. Comstock, Lindl B. и др.

В условиях массового производства, когда в процессе сборки на автомобильную технику устанавливаются электротехнические компоненты, изготавливаемые, в соответствии с действующей нормативно-технической

документацией (НТД), различными поставщиками, по сути, в бортовом комплексе, в некоторой степени, формируется уникальная электромагнитная среда, характеризующаяся индивидуальными особенностями работы каждого электрокомпонента и БЭК в целом. В полной мере оценить взаимное влияние электрокомпонентов, посредством электромагнитных помех, на этапах проектирования бортового электротехнического комплекса не представляется возможным, как раз из-за ограниченности серий конструкторских испытаний, наличия индивидуальной картины изменчивости электротехнических параметров в установленных техническими условиями границах и их вероятностного характера.

Именно поэтому важным этапом выявления проблем помехоустойчивости БЭК АТС является испытание и контроль уже на этапе производства. В процессе контроля удается проверить правильность заложенных конструктором ЭМС решений, а также в случае обнаружения нарушений работоспособности доработать изделия до актуализированных требований. В настоящее время на законодательном уровне разработан комплекс методов контроля и испытаний. Чтобы получить одобрение типа, любой БЭК в составе АТС как в России, так и за рубежом должен пройти сертификационные испытания. Именно поэтому, для обеспечения безопасности эксплуатации АТС, с точки зрения ЭМС, необходимо постоянно совершенствовать методологию испытаний и контроля БЭК АТС.

Диссертационная работа выполнена в рамках решения Комиссии Таможенного союза от 09.12.2011 г. №877 (ред. от 13.12.2016) «О принятии технического регламента Таможенного союза «О безопасности колесных транспортных средств».

**Цель работы:** повышение электромагнитной безопасности новых автомобилей на основе совершенствования системы контроля бортового электротехнического комплекса.

**Решаемые задачи:**

1. Комплексный научно-технический и практический анализ проблемы ЭМС бортового электротехнического комплекса АТС.

2. Разработка системы контроля помехоустойчивости БЭК АТС к внешним техногенным электромагнитным воздействиям.

3. Разработка алгоритма для нахождения предельно допустимого уровня помехоустойчивости БЭК новых АТС в заданном диапазоне частот воздействующих сигналов.

4. Анализ факторов, влияющих на разброс параметров помехоустойчивости БЭК АТС.

5. Разработка математической модели и критерия оценки соответствия требованиям помехоустойчивости БЭК партии новых АТС.

6. Проведение экспериментальных исследований помехоустойчивости БЭК АТС к узкополосному электромагнитному воздействию.

**Объект исследования:** бортовой электротехнический комплекс автотранспортных средств.

**Предмет исследования:** система контроля помехоустойчивости бортового электротехнического комплекса автотранспортных средств к электромагнитным воздействиям.

**Методы исследования,** применяемые в работе, базируются на теориях электродинамики и распространения радиоволн, электрических цепей и сигналов, электромагнитной совместимости, планирования эксперимента.

Экспериментальные исследования проводились с применением аттестованного оборудования лаборатории исследования электромагнитной совместимости Волжского автомобильного завода (г. Тольятти), а обработка данных осуществлялась с использованием прикладной программы Mathcad.

**Обоснованность и достоверность результатов** работы определяются корректным применением математических методов исследования, а также большим объемом обработанных экспериментальных данных, полученных в лаборатории ЭМС ПАО «АВТОВАЗ».

#### **Научная новизна**

1. Разработана система контроля БЭК АТС по параметрам ЭМС исходя из перспектив развития технологий ЭМБ и АКЭУ, отличающаяся от известных учетом неопределенности ориентации автомобиля по отношению к источнику излучения, параметров широкополосного воздействия ЭМП, а также комплексностью оценки помехоустойчивости БЭК в ездовом цикле новых АТС.

2. Предложен алгоритм системы контроля ЭМС, позволяющий определить предельно допустимый уровень помехоустойчивости БЭК АТС в заданном диапазоне частот электромагнитных воздействий.

3. Разработана вероятностная математическая модель и критерий оценки соответствия БЭК партии новых АТС, по требованиям помехоустойчивости, в условиях массового автомобильного производства.

#### **Практическая ценность работы:**

1. Рекомендованы новые режимы, условия и параметры контрольных испытательных тестов БЭК АТС с внешним электромагнитным воздействием, позволяющие более полно и достоверно оценить их помехоустойчивость.

2. Предложена методика расчета оценки соответствия требованиям помехоустойчивости БЭК для партии АТС, позволяющая проводить анализ конструкторских решений по помехозащищенности, а также принимать решения о приемке автомобилей в условиях действующего производства по показателям ЭМС.

3. Уточнен диапазон частот воздействующих сигналов, в котором наиболее ожидаемы нарушения работоспособности БЭК АТС, что позволяет сформулировать более полные технические требования к обеспечению помехозащищенности БЭК на этапе проектирования.

#### **Положения, выносимые на защиту**

1. Система контроля БЭК АТС на помехоустойчивость к внешним техногенным электромагнитным воздействиям.

2. Алгоритм системы контроля ЭМС позволяющий определить предельно допустимый уровень помехоустойчивости БЭК новых АТС в заданном диапазоне частот.

3. Вероятностная математическая модель и критерий оценки соответствия требованиям помехоустойчивости БЭК для партий новых АТС одинаковых моделей и комплектаций.

4. Результаты экспериментальных исследований помехоустойчивости БЭК АТС к электромагнитному воздействию в широком диапазоне частот.

**Область исследования** соответствует п. 2. «Обоснование совокупности технических, технологических, экономических, экологических и социальных критериев оценки принимаемых решений в области проектирования, создания и эксплуатации электротехнических комплексов и систем», п. 4. «Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях», п. 5. «Разработка безопасной и эффективной эксплуатации, утилизации и ликвидации электротехнических комплексов и систем после выработки ими положенного ресурса», паспорта специальности 05.09.03 Электротехнические комплексы и системы.

#### **Апробация работы**

Результаты работы обсуждались на профильных совещаниях научно-технического центра ПАО «АВТОВАЗ».

Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на: III Всероссийской научно-технической конференции «Технологии, измерения и испытания в области электромагнитной совместимости» (Москва, ВШЭ, 2016); XVII Международной научно-технической конференции «Проблемы техники и технологий телекоммуникаций» (Самара, ПГУТИ, 2016); IX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов «Наука и творчество: взгляд молодых профессионалов» (Тольятти, ПВГУС, 2016); XX аспирантско-магистерском научном семинаре, посвященного дню энергетика (Казань, КГЭУ, 2016); IV Всероссийской научно-технической конференции «Технологии, измерения и испытания в области электромагнитной совместимости» (Москва, ВШЭ, 2017); XII международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» (Казань, КГЭУ, 2017); VIII Международной молодежной научно-технической конференции (Самара, СамГТУ, 2017); V Всероссийской научно-технической конференции «Технологии, измерения и испытания в области электромагнитной совместимости» (Москва, ВШЭ, 2018).

**Реализация результатов работы.** Разработанный в диссертации научно-практический инструментарий прошел апробацию и внедрен в практику оценки БЭК АТС в лаборатории электромагнитной совместимости ПАО «АВТОВАЗ».

**Публикации.** По тематике исследований опубликовано 16 работ, общим объемом 3,4 п.л., в том числе 5 статей в журналах, входящих в перечень рекомендованных ВАК РФ, а также 2 патента на изобретение.

**Личный вклад автора.** В работах, выполненных в соавторстве, соискателю принадлежит: в работе [47] – участие в проведении экспериментальных исследований, получена формула частоты следования импульсов для критического воздействия на канал синхронизации двигателя; в работах [56, 59] – участие в проведении экспериментальных исследований и их анализ; в работе [55] – исследование устойчивости канала контроля работоспособности катушек зажигания; в работах [54; 46] – разработка математической модели соответствия автомобилей требованиям помехоустойчивости и участие в проведении экспериментальных исследований; в работах [45; 49] – разработка метода азимутального позиционирования, получение выражения минимального расстояния от АТС до излучающей антенны; в работах [58; 60] – анализ проблем испытаний АТС на ЭМС и проведение экспериментальных исследований; в работе [52] – разработка цикла испытаний на помехоустойчивость системы «Эра ГЛОНАСС»; в работе [57] – разработка требований на помехозащищенное устройство сбора данных; в работе [51] – разработка ездового цикла гибридного автомобиля и участие в экспериментальных исследованиях; в работе [50] – разработка комплексного ездового цикла для испытаний автомобиля; в работе [53] – решения по обеспечению соответствия требованиям ЭМС гибридного автомобиля; в работе [48] – вывод формулы шага перестройки по частоте при испытаниях на ЭМС.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация включает в себя введение, четыре главы, заключение, библиографический список и приложение. Основной текст изложен на 172 страницах, содержит 107 рисунков, 8 таблиц. Библиографический список состоит из 92 наименований и приложений на 3 страницах.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** показана актуальность проблемы, сформулированы цель и решаемые задачи, изложены научная новизна, практическая значимость работы и положения, выносимые на защиту, а также методы решения поставленных в диссертационной работе задач.

**В первой главе** раскрывается содержание проблемы помехоустойчивости электротехнических систем автомобилей к электромагнитным воздействиям. Произведен обзор и анализ источников электромагнитных помех, формирующих внешнюю электромагнитную обстановку. Дан обзор существующих систем контроля и испытания на восприимчивость к внешним электромагнитным воздействиям и критериев оценок помехоустойчивости. Проанализированы известные нарушения работоспособности БЭК автомобилей.

Анализ внешней электромагнитной обстановки показал, что наиболее мощным естественным источником помех является грозовой разряд, а из техногенных: линии электропередач, контактная сеть железных дорог, радиотехнические системы и ядерный взрыв. Спектр электромагнитных излучений сосредоточен в области частот 50 Гц – 300 ГГц. Наиболее интенсивными по суммарному времени воздействия являются источники,

работающие в радиодиапазоне от 20 МГц до 2 ГГц, а напряженность электрического поля может достигать уровня 100 В/м и более.

Анализ известных ранее исследований нарушений работоспособности, возникающих под воздействием внешнего электромагнитного поля показал, что БЭК АТС наиболее уязвимо к электромагнитному излучению на частотах выше 20 МГц. Нарушение работоспособности при воздействии ЭМП малых энергий наиболее вероятно в диапазоне от 100 МГц до 1,5 ГГц.

Существующие методы оценки результатов испытаний на помехоустойчивость АТС сводятся к единственному подходу по критерию «соответствует/не соответствует», который достаточен для единичного или штучного производства автомобилей. В условиях массового производства АТС требуются оценки соответствия, основанные на вероятностном подходе.

Обозначенные проблемы положены в основу исследования с целью повышения электромагнитной безопасности автомобильного транспорта в условиях современной электромагнитной обстановки.

**Во второй главе** разработана система контроля БЭК АТС по параметрам ЭМС исходя из перспектив развития технологий ЭМБ и АКЭУ, отличающаяся от известных учетом случайности ориентации автомобиля по отношению к источнику излучения, параметров широкополосного воздействия ЭМП, а также комплексностью оценки помехоустойчивости БЭК в ездовом цикле АТС.

Показано, что автомобиль с позиции электродинамики является несимметричной сложной приемной системой. При ее попадании в сложную электромагнитную обстановку она может быть ориентирована по отношению к источнику случайным образом и спозиционирована в конкретный момент в направлениях эффективного или не эффективного радиоприема (рисунок 1).

На основании исследований, предложена методика контроля БЭК АТС, отличающаяся от известных, позиционированием автомобиля во время теста во всем диапазоне углов азимутальной плоскости и позволяющая проводить тесты ЭТС на восприимчивость в условиях электромагнитной обстановки, приближенных к наиболее реальным особенностям эксплуатации автомобиля.

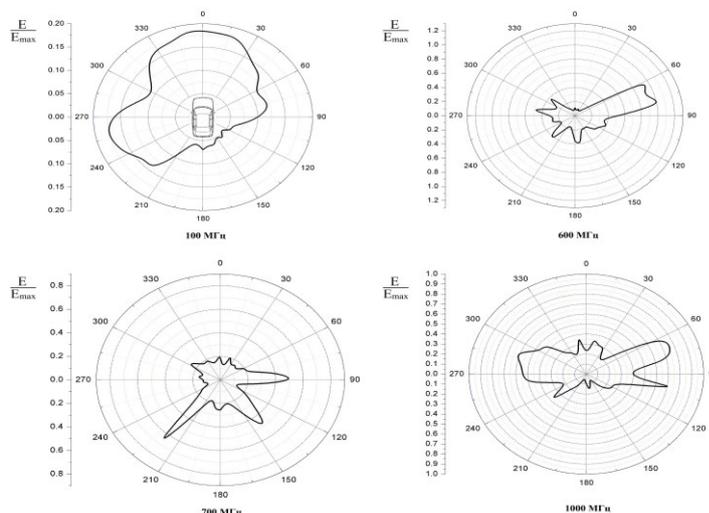


Рисунок 1 – Диаграммы направленности автомобиля как сложной антенны

Выбран наиболее приемлемый с позиций затрат на испытания и полноту результатов дискретный азимутальный шаг углового позиционирования автомобиля по отношению к излучающей антенне, составляющий  $\beta_{\text{опт.д}}=10$  град. Обоснован параметр расстояния между тестируемым автомобилем и полеобразующей системой, которое определяется выражением

$$S_{\min} \leq \frac{l}{2\text{tg}(\Theta/2)}, \quad (1)$$

где  $l$  – максимальный линейный размер автомобиля;  $\Theta$  – угол главного лепестка диаграммы направленности полеобразующей системы в горизонтальной плоскости.

Результаты испытаний для анализа помехоустойчивости ЭТС (БЭК) представляются в виде матричного массива

$$E_n(f, \beta) = \begin{pmatrix} E_{f_{\min}, \beta_{\min}} & E_{f_{\min}, \beta_{\min} + \Delta\beta m} & \dots & E_{f_{\min}, \beta_{\max}} \\ E_{f_{\min} + \Delta f n, \beta_{\min}} & E_{f_{\min} + \Delta f n, \beta_{\min} + \Delta\beta m} & \dots & E_{f_{\min} + \Delta f n, \beta_{\max}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ E_{f_{\max}, \beta_{\min}} & E_{f_{\max}, \beta_{\min} + \Delta\beta m} & \dots & E_{f_{\max}, \beta_{\max}} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

Разработана методика, позволяющая в отличие от известных, тестировать БЭК автомобиля на широкополосное электромагнитное воздействие.

Выбрана форма импульса вида положительного полупериода синусоиды с несущей частотой, меняющейся от  $f_0 = 1$  ГГц до 1,4 ГГц, соответствующей спектру, который наиболее критичен для ЭТС АТС. Испытательное воздействие имеет следующий вид:

$$S(t) = \begin{cases} S_{\max} \sin(2\pi f_0 t); & t \in [(k-1)T; \tau + (k-1)T] \\ 0 & ; t \in (k\tau; kT) \end{cases}, \quad (3)$$

где  $k = 1, 2, 3, \dots$  – количество импульсов;  $\tau=0,5 \times 10^{-9}$  с – длительность импульса;  $T$  – период следования импульсов.

Минимальная частота следования импульсов определяется выражением

$$T \leq \frac{1}{2kn_{\text{ДВС}}}, \quad (4)$$

где  $n_{\text{ДВС}}$  – частота вращения коленчатого вала (об/мин);  $k$  – количество зубьев на задающем диске.

Расчитан минимальный период следования испытательных импульсов, равный 83 мс.

Для автомобилей гражданского назначения уровень пикового тестового сверширокополосного электромагнитного воздействия, соответствующий функциональному классу «А» составляет 50 В/м, а для класса «В» - 100 В/м.

Произведено совершенствование ездового цикла, которое позволяет проводить комплексные испытания ЭТС (рисунок 2). Он реализует в себе условия, при которых в динамических режимах проверяются системы управления двигателем, автоматической трансмиссии, ABS, ASR и ESP. Его

реализация осуществляется на динамометрическом роликовом стенде с применением программируемого робота-автопилота. Поэтому для автоматической реализации цикл представлен в виде уравнений прямой

$$V_i(t) = \alpha_i t + V_{0i}, \quad (5)$$

где  $\alpha_i = (V_{i+1} - V_i) / (t_{i+1} - t_i)$ ;  $i = 1, 2, \dots, 10$ ,

$$V_{0i} = (V_i t_{i+1} - V_{i+1} t_i) / (t_{i+1} - t_i), \quad (6)$$

А коэффициенты  $V_{0i}$  и  $\alpha_i$  находятся из начальных условий цикла и экспериментально:  $\alpha_1 = \alpha_3 = \alpha_7 = 0$ ,  $\alpha_2 \leq 4,5$ ;  $\alpha_4 \leq 4,5$ ;  $\alpha_5 \geq -8,9$ ;  $\alpha_6 \leq -13,3$ ;  $\alpha_8 \geq 20$ .

Для промежутка времени  $t_9 - t_{10}$  точный расчет коэффициентов не требуется, т.к. автомобиль возвращается в начальное состояние цикла для начала другого.

Аналогично разработан инструментарий контрольных тестов для ездовых циклов испытаний ЭМБ, АКЭУ, а также системы «ЭРА ГЛОНАСС».

Получено выражение шага перестройки воздействия по частоте, позволяющее точно определить границы диапазонов частот с низкой помехоустойчивостью

$$f_n = 1,015^{n-1} f_1, \quad (7)$$

где  $n=1, 2, 3, \dots$

На основании полученного выражения предложен алгоритм нахождения минимального уровня помехоустойчивости ЭТС (БЭК) АТС (рисунок 3). Он сводится к итерационному снижению уровня электромагнитного воздействия, сужая тем самым частотную область в котором ищется минимум. Итерации производятся до момента регистрации сбоев только на двух частотах диапазона. В центре между ними и находится частота с минимальным уровнем помехоустойчивости.

По результатам исследований показано, что относительная погрешность нахождения уровня помехоустойчивости, в сравнении с применяемой методологией, снижается на 12,7%.

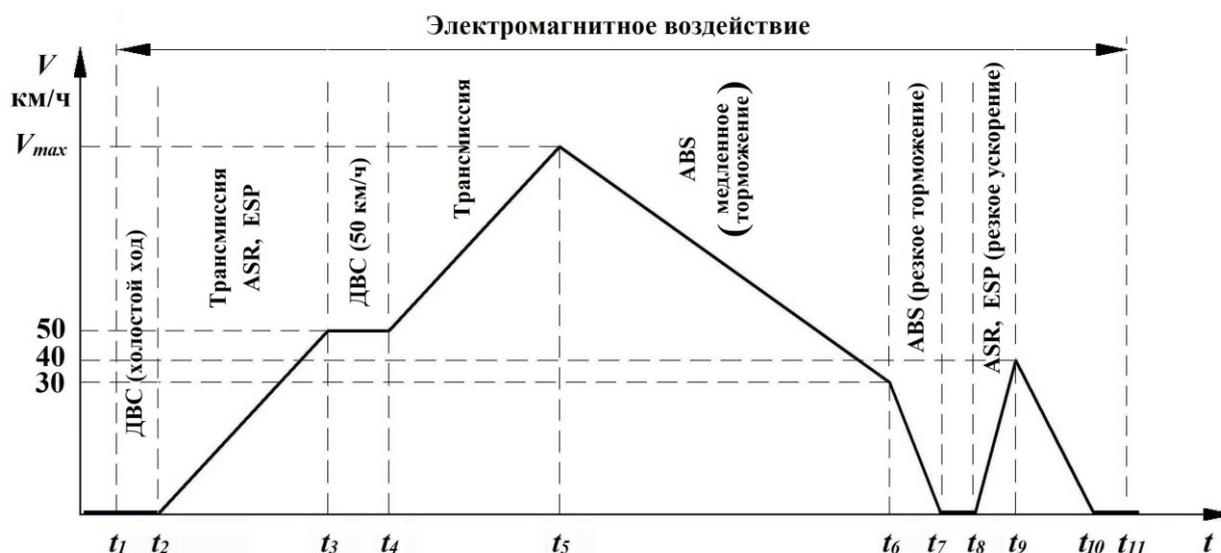


Рисунок 2 – Диаграмма ездового цикла для комплексных испытаний ЭТС автомобилей

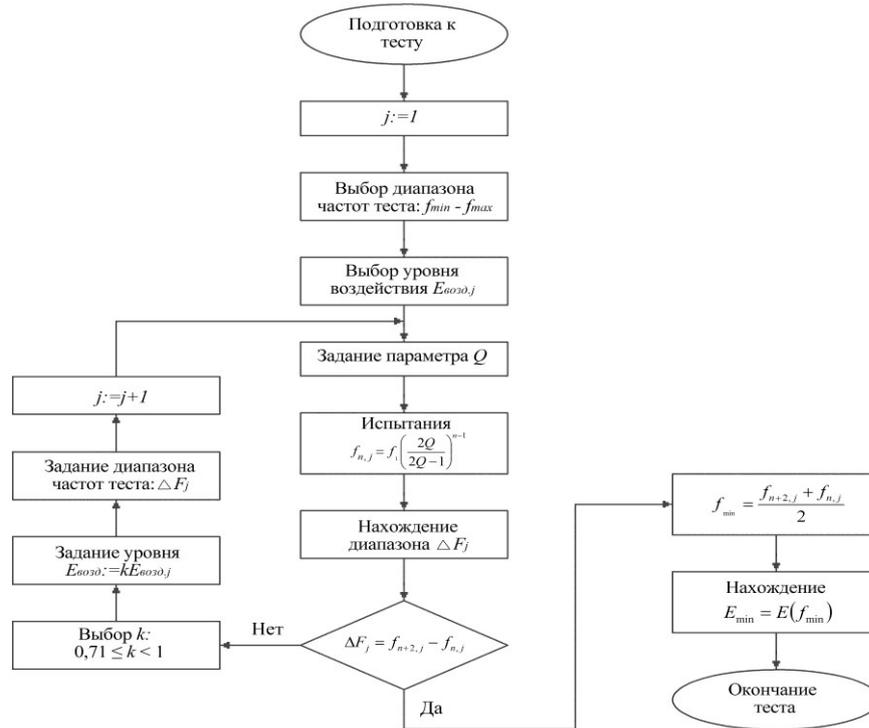


Рисунок 3 – Алгоритм нахождения минимального уровня помехоустойчивости ЭТС

В третьей главе разработана вероятностная математическая модель, критерий и предложена методика оценки соответствия БЭК АТС по требованиям помехоустойчивости для партий автомобилей одинаковых моделей и комплектаций.

Результаты контрольных испытаний показывают, что помехоустойчивость ЭТС (БЭК) автомобилей одинаковых моделей и комплектаций значительно различается (рисунок 4). Проведенный анализ позволил выявить две группы факторов, определяющих параметры ЭМС. К первой относятся нестабильность параметров испытательного теста: амплитуда электромагнитного воздействия и позиционирование тестируемого автомобиля по отношению к полеобразующей системе. Вторая группа охватывает разброс конструкторско-технологических параметров автомобилей в том числе БЭК.

Перечисленные факторов не зависят друг от друга. По отношению к испытуемым образцам автомобилей имеют случайный характер. На основании этого, основываясь на центральной предельной теореме А.Н. Ляпунова, сделан вывод что распределение минимальных уровней помехоустойчивости БЭК АТС подчиняется нормальному закону распределения случайной величины. Данный вывод был подтвержден экспериментально по результатам статистической обработки 50 автомобилей. На основании критерия согласия  $\chi^2$  Пирсона (для  $\chi^2 = 2,197$  и  $r = 6$ ) показано, что с вероятностью  $P = 0,9$  гипотеза о распределении минимальных уровней помехоустойчивости электротехнических систем автомобилей по нормальному закону не противоречит опытным данным.

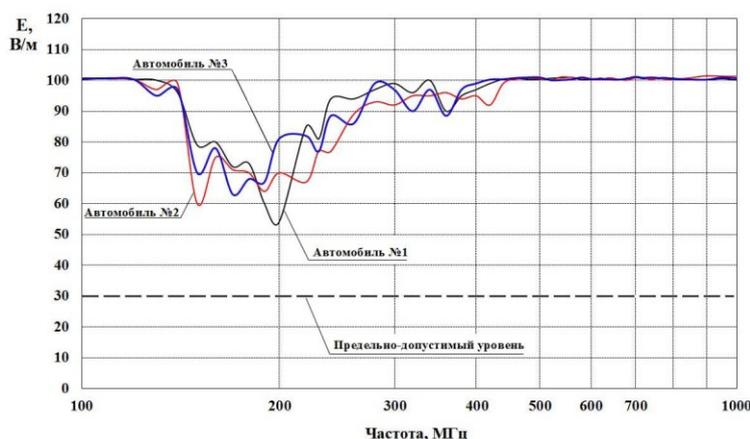


Рисунок 4 – Диаграмма изменения помехоустойчивости электронных систем управления двигателем автомобилей LADA KALINA одинаковых комплектаций

Вероятность соответствия требованиям электротехнических систем большой партии автомобилей равна

$$P_A = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sqrt{[(n-1)S^2] / \chi_\alpha^2}} \int_{E_{np}}^{\infty} - \left[ \frac{E - \left( \bar{E}_{\min} - t_\alpha \frac{S}{\sqrt{n}} \right)}{\sqrt{\frac{2(n-1)S^2}{\chi_\alpha^2}}} \right]^2 dE, \quad (8)$$

где  $E_{np}$  – предельно-допустимый уровень помехоустойчивости для электротехнических систем автомобилей;  $n$  – количество тестируемых образцов;  $\bar{E}_{\min}$  и  $S^2$  – эффективные оценки математического ожидания минимального уровня помехоустойчивости и дисперсии;  $t_\alpha$  и  $\chi_\alpha^2$  – коэффициенты Стьюдента и распределения  $\chi^2$  для заданной надежности.

Критерием соответствия партии автомобилей требованиям является неравенство

$$P_A \geq P_{np}, \quad (9)$$

где  $P_{np}$  – предельная вероятность, характеризующая предельно-допустимый показатель качества.

Методика оценки соответствия требованиям помехоустойчивости сводится к следующей последовательности. По результатам испытаний ограниченной выборки автомобилей, не превышающей четырех образцов рассчитываются эффективные оценки математического ожидания минимального уровня помехоустойчивости и дисперсии. Выбирается уровень надежности их оценок. Для автомобильной продукции гражданского назначения он равен 0,8, а для автомобилей специального назначения от 0,95 до 0,99. Далее на основании заданной надежности и с учетом количества испытуемых образцов по таблицам выбираются коэффициенты  $t_\alpha$  и  $\chi_\alpha^2$ , и по (8) вычисляется  $P_A$ . Вероятность  $P_A$  сравнивается с предельной вероятностью  $P_{np}$ . Для автомобилей гражданского назначения  $P_{np} \geq 0,8$ , а для специального назначения  $P_{np} = 0,95 \dots 0,98$ .

Если  $P_A \geq P_{np}$ , то партия считается соответствующей предельно-допустимыми нормам помехоустойчивости. Соответственно дальнейшие мероприятия по увеличению защищенности электротехнических систем к

электромагнитному воздействию не требуются. При результате  $P_A < P_{np}$  необходимо проводить доработки с целью повышения помехоустойчивости.

**В четвертой главе** приводятся результаты исследований помехоустойчивости БЭК АТС с использованием разработанных в работе методик, алгоритма и инструментария. Экспериментально подтверждена обоснованность применения усовершенствованного метода.

Эксперименты проводились в аттестованной безэховой камере лаборатории электромагнитной совместимости ПАО «АВТОВАЗ» (рисунок 5). Оборудование лаборатории позволяет проводить испытания автомобилей на всех режимах. Ездовые циклы осуществлялись роботом-автопилотом, а контроль и измерение параметров электротехнических систем осуществлялось при помощи помехозащищенных видеокамер, а также сканера DDT-2000 ф.DIRELEC, подключаемого к CAN-шине через стандартный автомобильный разъем OBD2 и передающего данные по оптоволоконной линии связи.



Рисунок 5 – Безэховая камера для испытаний автомобилей

*Исследования АКЭУ* на базе LADA GRANTA выявили три проблемы: прекращение процесса заряда тяговой аккумуляторной батареи в фазе рекуперации энергии; прекращение работы двигателя внутреннего сгорания и электродвигателя (рисунок 6 а). В случае заряженной тяговой батареи управление автоматически переводилось на электродвигатель и автомобиль продолжал движение. Переход работы на электротягу происходил без существенных изменений в процессе движения. После прекращения электромагнитного воздействия двигатель внутреннего сгорания начинал функционировать.

Нарушение работоспособности электродвигателя происходило под воздействием импульсного электромагнитного излучения с периодом следования импульсов 4600 мкс. и длительностью импульса 577 мкс. После прекращения воздействия он не возобновлял свою работу. Для работы автомобиля на электротяге необходимо было в отсутствие электромагнитного воздействия произвести операцию снятия и подачи электропитания от аккумуляторной батареи.

*Исследования на помехоустойчивость ЭМБ* выявили аналогичную проблему, как и у АКЭУ. Нарушение работоспособности проявлялось в виде прекращения работы электродвигателя. Для возобновления работы ЭМБ необходимо было произвести операцию снятия и подачи электропитания от аккумуляторной батареи.

Исследования помехоустойчивости электронной системы управления ДВС автомобиля LADA Kalina выявили проблему, приводящую к прекращению работы двигателя из-за ложной диагностики неисправности индивидуальных катушек зажигания (рисунок 6 б). В процессе экспериментов было определено, что помехи, наводимые в электрических цепях, искажали информацию по каналу контроля работоспособности катушек зажигания электронной системы управления ДВС. Ложно диагностировалась неисправность катушки зажигания и запрещалось накопление энергии в катушке и топливоподача в соответствующий цилиндр двигателя. Если помехи искажали информацию по нескольким каналам диагностики, то принудительно отключались соответствующие катушки и форсунки. Из-за этого ДВС прекращал работать и автомобиль останавливался.

Исследование помехоустойчивости системы ABS выявили проблему выхода из строя порта датчика скорости колеса. Из-за этой неисправности ABS перестал штатно функционировать. Данное нарушение работоспособности классифицируется как класс Е, т.к. требовался ремонт блока.

При исследовании помехоустойчивости электронной системы управления автоматизированной коробкой передач наблюдалось два вида сбоя, связанных с ложной диагностикой из-за воздействия на цепь датчика положения привода выбора передач и самопроизвольного переключения на нейтральную передачу (рисунок 6 в).

Характер проблем ЭМС показал, что при недостаточной помехозащищенности ЭТС электромагнитные воздействия способны изменить траекторию и характер движения автомобиля. По результатам исследований определено, что наведенные электромагнитным полем помехи воздействуют по слабозащищенным каналам, искажая измерительные сигналы аппаратуры, а также воздействуют на микропроцессоры по сигнальным цепям и проводам питания, вследствие чего из-за искажения, потери полезной информации или зависания микропроцессоров происходят нарушения работоспособности электротехнических систем.

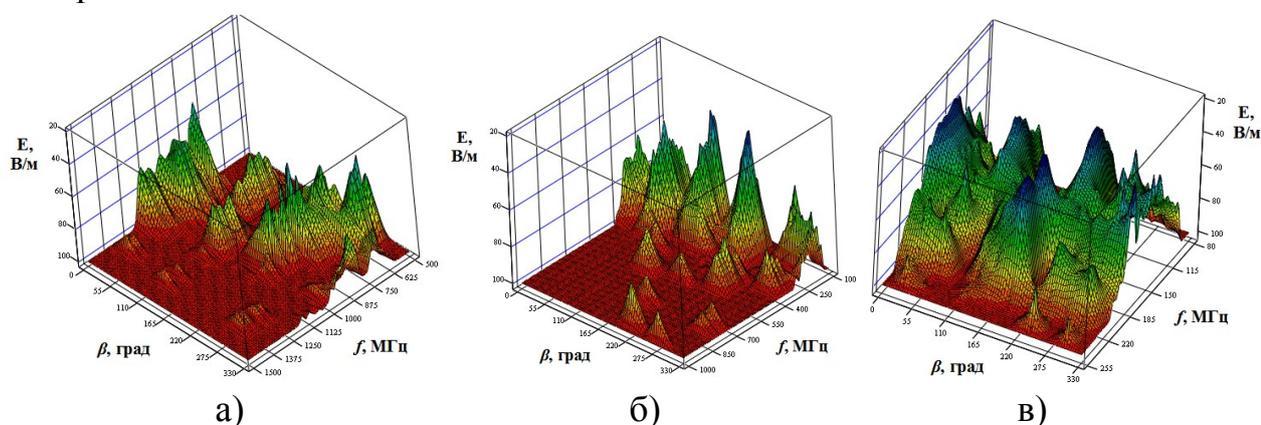


Рисунок 6 – Диаграмма оценки помехоустойчивости ЭТС автомобиля:  
 а) система управления электродвигателем АКЭУ; б) система управления ДВС;  
 в) электронная система управления автоматизированной коробкой передач  
 (зона недопустимых значений выделена красным цветом)

Сравнение результатов используемой до настоящего времени и предлагаемой методологии показало обоснованность применения тестов в азимутальной области, т.к. в большей части исследуемого диапазона частот уровни помехоустойчивости ЭТС при стандартном фронтальном позиционировании выше, чем при других азимутальных углах позиционирования автомобиля к излучателю (рисунок 7). Проведенные эксперименты доказывают, что испытания во всем диапазоне азимутальных углов позволяет, по сравнению со стандартными контрольными тестами, более полно и достоверно оценить ЭТС АТС на соответствие требованиям ЭМС.

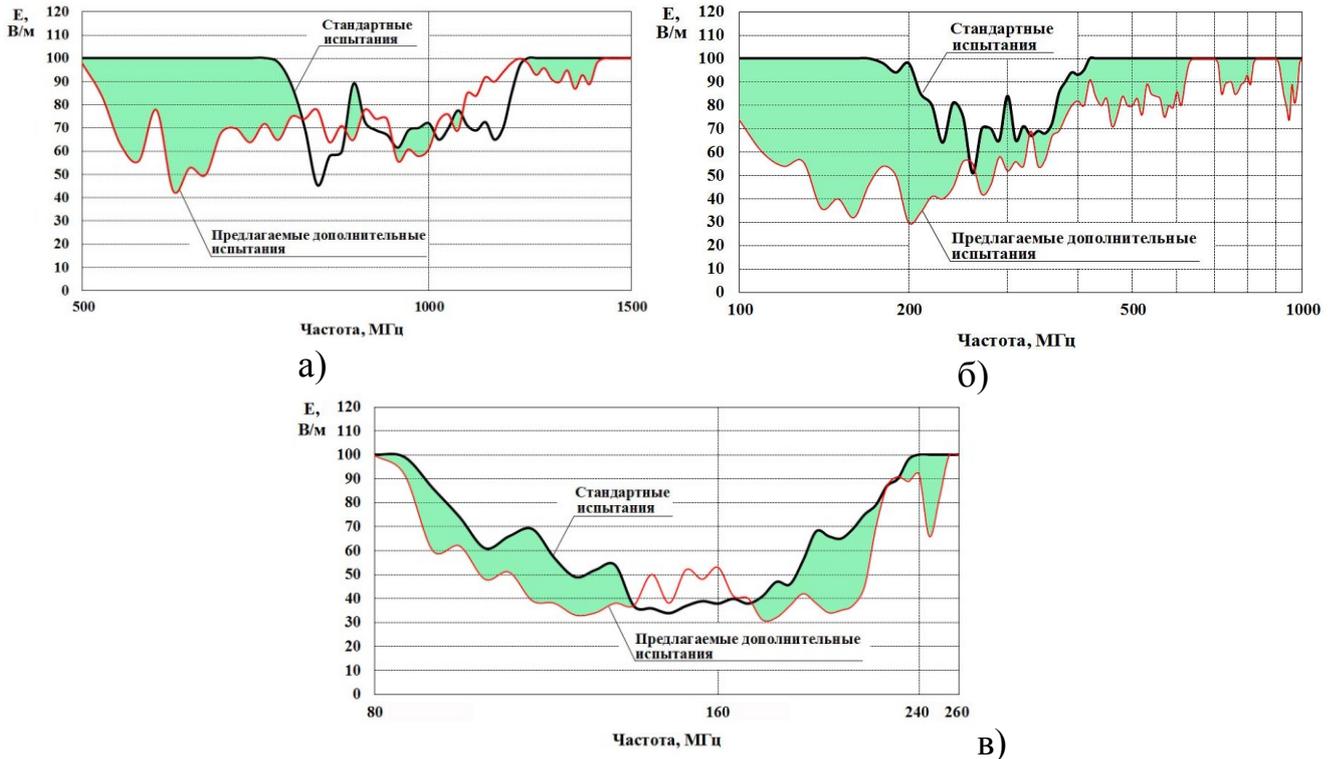


Рисунок 7 – Диаграмма определения минимальных значений помехоустойчивости ЭТС автомобилей: а) система управления электродвигателем АКЭУ; б) система управления ДВС; в) электронная система управления автоматизированной коробкой передач

При проведении экспериментов выявлено, что нарушение работоспособности ЭТС автомобилей наблюдались в диапазоне частот от 80 до 1400 МГц. Определена наиболее критическая область частот 97 – 580 МГц, где проблемы ЭМС наиболее ожидаемы. Найдены уровни помехоустойчивости ЭТС (БЭК), минимальный из которых составил 25 В/м на частоте 201 МГц при азимутальном угле автомобиля 120 град. Данное значение помехоустойчивости ниже международных требований, что подтверждает важность проведения испытаний на ЭМС в азимутальной плоскости с целью гарантированного обеспечения электромагнитной безопасности автомобилей.

**В приложениях** приведены сертификаты поверки оборудования лаборатории ЭМС ПАО «АВТОВАЗ» и акт внедрения результатов диссертационной работы.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Предложено решение важной научно-технической задачи, связанной с совершенствованием системы контроля бортового электротехнического комплекса новых автомобилей на помехоустойчивость к электромагнитным воздействиям. В ходе решения поставленной задачи в диссертации получены следующие основные научные и практические результаты:

1. Разработана система контроля БЭК, обеспечивающая повышение электромагнитной безопасности новых АТС в процессе эксплуатации, которая, в отличие от известных, учитывает параметры неопределенности ориентации автомобиля по отношению к источнику излучения, что позволяет проводить контрольные тесты на восприимчивость условий электромагнитной обстановки, приближенные к реальным особенностям эксплуатации АТС. Определено, что наиболее приемлемый дискретный угол поворота по азимуту составляет  $\beta_{\text{пт.д}}=10$  град. В рамках разработанной системы контроля обоснован выбор расстояния между АТС и полеобразующей системой, исходя из условия максимального линейного размера АТС. Предложена методика контрольных испытаний АТС, позволяющая тестировать на помехоустойчивость ЭТС к широкополосному электромагнитному внешнему воздействию. Выбрана однополярная форма импульса, представляющего собой полуволну синусоиды с частотой до 1,5 ГГц. Рассчитан минимальный период следования испытательных импульсов, равный 83 мс. Разработан инструментарий тестов ездовых циклов, отличающийся от известных, возможностью реализации различных динамических режимов для комплексной оценки помехоустойчивости БЭК АТС. Найдены коэффициенты циклов для автоматизированной реализации в динамометрическом роликовом стенде с применением робота-автопилота.

2. Предложен алгоритм нахождения предельно допустимого уровня помехоустойчивости ЭТС новых АТС. Использование алгоритма в исследованиях ЭМС, позволяет получать более достоверный результат поиска предельно допустимого уровня помехоустойчивости в сравнении с применяемыми в настоящее время методиками, за счет применения экспериментально разработанной функции итерационного снижения уровня электромагнитного воздействия с целью определения частоты сигнала, при которой наблюдается минимальная помехоустойчивость и регистрируются сбои ЭТС (БЭК). Применение алгоритма обеспечивает снижение относительной погрешности поиска предельно допустимого уровня помехоустойчивости до 12,7%.

3. Разработана вероятностная математическая модель и критерий оценки соответствия требованиям помехоустойчивости БЭК новых АТС одинаковых моделей и комплектаций, позволяющие проводить анализ конструкторских решений по помехозащищенности и приемку продукции в условиях массового производства. Вероятностная математическая модель и критерий оценки соответствия требованиям помехоустойчивости БЭК АТС формируют базис

для организации приемочного контроля партии новых автомобилей в условиях массового производства, по параметрам ЭМС.

4. Проведенные, на основе предложенной системы контроля и алгоритма нахождения предельно допустимого уровня помехоустойчивости БЭК АТС, экспериментальные исследования позволили определить уровни помехоустойчивости и изучить причины нарушения работоспособности БЭК. Показано, что проблемы электромагнитной совместимости БЭК АТС наблюдаются в диапазоне частот от 80 до 1400 МГц. Наиболее ожидаемы нарушения работоспособности в диапазоне частот от 97 до 580 МГц. Экспериментально подтверждено, что по сравнению с ранее известными системами контроля, предлагаемая позволяет более полно оценить БЭК АТС на соответствие требованиям ЭМС. Все предложенные технические решения прошли апробацию и внедрены в практику крупнейшего производителя легковых автомобилей ПАО «АВТОВАЗ».

### **СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

#### **Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:**

1. Подгорный, А.С. Автотранспортное средство в условиях воздействия гармонических электромагнитных поле / П.А. Николаев, Л.Н. Кечиев, Н.В. Балюк, А.С. Подгорный // Технологии ЭМС. – 2016. – № 2(57). – С. 5-14.

2. Подгорный, А.С. Требования обеспечения устойчивости основных систем автотранспортных средств в условиях сложной электромагнитной обстановки / П.А. Николаев, Л.Н. Кечиев, Н.В. Балюк, А.С. Подгорный // Технологии ЭМС. – 2016. – № 3(58). – С. 3-10.

3. Подгорный, А.С. Повышение устойчивости автотранспортных средств в условиях сложной электромагнитной обстановки / П.А. Николаев, Л.Н. Кечиев, Н.В. Балюк, А.С. Подгорный // Технологии ЭМС. – 2017. – № 1(60). – С. 3-12.

4. Подгорный, А.С. Оценка соответствия автомобилей требованиям помехоустойчивости к внешним электромагнитным воздействиям / П.А. Николаев, В.Н. Козловский, А.С. Подгорный // Грузовик. – 2017. – № 10. – С. 44-48.

5. Подгорный, А.С. Испытания автотранспортных средств на устойчивость к внешним электромагнитным воздействиям / П.А. Николаев, В.Н. Козловский, А.С. Подгорный // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2017. – № 5. – С. 43-46.

#### **Публикации в других изданиях и материалы конференций:**

6. Подгорный, А.С. Проблемы испытаний автотранспортных средств на восприимчивость к электромагнитному воздействию / А.С. Подгорный, П.А. Николаев // Технологии, измерения и испытания в области электромагнитной совместимости: труды III Всероссийской НТК «Техно-ЭМС 2016». – М.: Грифон, 2016. – С. 136-138.

7. Подгорный, А.С. Испытания системы «ЭРА ГЛОНАСС» на помехоустойчивость / А.С. Подгорный, П.А. Николаев // Технологии, измерения и испытания в области электромагнитной совместимости: труды III Всероссийской НТК «Техно-ЭМС 2016». – М.: Грифон, 2016. – С. 139-141.

8. Подгорный, А.С. Помехозащищенное устройство сбора данных для испытаний автомобилей на устойчивость к электромагнитному воздействию / А.С.

Подгорний, П.А. Николаев // Проблемы техники и технологий телекоммуникаций: XVII Международная научно-техническая конференция. – Самара: ПГУТИ, 2016. – С. 424-435.

9. Подгорний, А.С. Позиционирование автотранспортного средства при испытаниях на устойчивость к электромагнитному воздействию / А.С. Подгорний, П.А. Николаев // Наука и творчество: взгляд молодых профессионалов: Сборник статей IX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов. – Тольятти: ПВГУС, 2016. – С.138-141

10. Подгорний, А.С. Испытания на восприимчивость к электромагнитному излучению гибридных автомобилей / А.С. Подгорний, П.А. Николаев // Материалы докладов XX аспирантско-магистерского научного семинара, посвященного дню энергетика. – Казань: КГЭУ, 2016. – Том №1. – С.186-187.

11. Подгорний, А.С. Испытания автомобилей на восприимчивость к электромагнитному воздействию / А.С. Подгорний, П.А. Николаев // Технологии, измерения и испытания в области электромагнитной совместимости: труды IV Всероссийской НТК «Техно-ЭМС 2017». – М.: Грифон, 2017. – С. 84-85.

12. Подгорний, А.С. Обеспечение параметров электромагнитной совместимости гибридных автомобилей / А.С. Подгорний, П.А. Николаев // Тинчуринские чтения: Материалы докладов XII международной молодежной научной конференции. – Казань: КГЭУ, 2017. – Том №1. – С.317-327.

13. Подгорний, А.С. Выбор шага перестройки по частоте при испытаниях электромобилей на внешнее электромагнитное воздействие / А.С. Подгорний, П.А. Николаев, А.Д. Николаев // Электроэнергетика глазами молодежи – 2017: материалы VIII Международной молодёжной научно-технической конференции. – Самара: СамГТУ, 2017. – Том №1. – С. 162-163.

14. Подгорний, А.С. Проблемы оценки помехоустойчивости автомобилей / А.С. Подгорний, П.А. Николаев // Технологии, измерения и испытания в области электромагнитной совместимости: труды V Всероссийской НТК «Техно-ЭМС 2018». – М.: Грифон, 2018. – С. 74-75.

#### Патенты

15. Пат. № 2640376 Российская Федерация. Способ испытаний электрооборудования автотранспортных средств на восприимчивость к электромагнитному полю [Текст] / А.С. Подгорний, П.А. Николаев, Б.М. Горшков, Н.С. Самохина; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Поволжский государственный университет сервиса». Оpubл. 28.12.17, Бюл. № 1.

16. Пат. № 2642024 Российская Федерация. Способ оценки технических средств на соответствие нормативным требованиям на помехоустойчивость [Текст] / П.А. Николаев, Т.Г. Герасимов, А.С. Подгорний; заявитель и патентообладатель Публичное акционерное общество «АВТОВАЗ». Оpubл. 23.01.18, Бюл. № 3.

Разрешено к печати диссертационным советом Д 212.217.04  
Протокол № 11 от 17.10.2019 г.

Подписано в печать с электронного оригинал-макета  
Бумага офсетная. Печать трафаретная.  
Усл. печ. л. 2,0. Тираж 120 экз. Заказ 82/02.