

ных работ за счет экономии распределяемого дорожно-строительного материала, а также продления срока службы асфальтобетонного покрытия автомобильной дороги.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Обзор основных технологий для выполнения ямочного ремонта асфальтобетонного покрытия на дворовых территориях / В. В. Петрусевич, В. В. Томашов, К. Д. Дашук [и др.] // Проблемы безопасности на транспорте : материалы XIV Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 20–21 нояб. 2025 г. : в 2 ч. Ч.2. – Гомель : БелГУТ, 2025. – С. 311–313.

2 Обзор отечественных малых машин и установок для ремонта асфальтобетонного покрытия / В. В. Петрусевич, Р. Ю. Доломанюк, К. Д. Дашук [и др.] // Проблемы безопасности на транспорте : материалы XIV Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 20–21 нояб. 2025 г. : в 2 ч. Ч. 2. – Гомель : БелГУТ, 2025. – С. 314–316.

3 **Петрусевич, В. В.** Основные принципы системы организации профилактической обработки в рамках выполнения технологических процессов текущего содержания автомобильных дорог / В. В. Петрусевич // Автомобильные дороги и мосты. – 2024. – № 1. – С. 4–13.

4 **Бочкарев, Д. И.** Моделирование технологического процесса профилактической обработки асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог / Д. И. Бочкарев, В. В. Петрусевич // Вестник БрГТУ. – 2024. – № 1. – С. 48–52.

Получено 16.06.2026

ISSN 2227-1155. Сборник студенческих научных работ.
Вып. 31. Гомель, 2026

УДК 621.317

С. А. МОЖАЕВ (МЭСм-31), *А. А. КАЛАЧЁВ* (ЭМ-31)

Научный руководитель – канд. техн. наук *В. Н. ГАЛУШКО*

ДИАГНОСТИКА КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ ОБМОТОК BLDC-ДВИГАТЕЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЧАСТОТНОГО АНАЛИЗА

Рассматриваются области применения, наиболее значимые преимущества BLDC-двигателей перед коллекторными и трехфазными асинхронными с преобразователем частоты. Предложен метод обнаружения дефектов обмоток с эмалевой изоляцией бесколлекторного двигателя на основе частотного анализа и приведено описание оборудования и приборов для выполнения экспериментов. На основании проведённых исследований можно сделать вывод, что импедансную характеристику целесообразно измерять без подвижной части с магнитами на большой частоте. Полученные результаты являются основой для создания методики и программно-аппаратного комплекса диагностики дефектов обмоток BLDC-двигателей.

Бесколлекторные электродвигатели постоянного тока (BLDC – *brushless direct current electric motor*) получили широкое применение благодаря высоким моменту и КПД, линейной (жесткой) механической характеристике, широкому диапазону регулирования частоты вращения. Бесколлекторные двигатели вытесняют коллекторные и трехфазные асинхронные двигатели с преобразователем частоты благодаря меньшим потерям мощности, большому ресурсу, высокой удельной мощности и точному регулированию частоты вращения [1–3].

Область применения BLDC-приводов достаточно широка:

1 Транспорт: электросамокаты, гироскутеры, электромобили (Nissan Leaf, Tesla Model 3 и пр.), дроны, квадрокоптеры, а также бытовой электроинструмент (шуруповёрты, дрели).

2 Бытовая и офисная техника: стиральные машины (Direct Drive), компьютерные вентиляторы, холодильники (инверторные компрессоры), пылесосы, кондиционеры.

3 Промышленность и автоматизация: станки с ЧПУ, конвейеры, робототехника (сервоприводы), промышленные насосы и вентиляторы.

4 Медицина и прецизионная техника: хирургические дрели, аппараты ИВЛ, центрифуги, инфузионные помпы.

5 Авиация, космос и оборона: приводы в самолетах (More Electric Aircraft), системы ориентации спутников, приводы наведения в ПВО, дроны.

6 Энергетика: следящие системы солнечных батарей, приводы систем охлаждения на солнечных/ветряных станциях.

Наиболее значимые преимущества BLDC-двигателей перед коллекторными: меньше шум и вибрация; отсутствует коллекторно-щеточный узел; высокая наработка на отказ; выше КПД при высокой частоте вращения.

Преимущества BLDC-двигателей перед трехфазными асинхронными с преобразователем частоты: меньше размеры для одинаковой мощности; универсальность контроллера; больше крутящий момент при низкой частоте вращения.

В настоящее время полноценная статистика отказов отсутствует, так как массовый выпуск BLDC-двигателей произошел только в последнее десятилетие. Для предприятий, занимающихся прокатом электросамокатов, существует проблема выхода приводов (до 3 % от имеющихся в наличии) по следующим причинам: перегрузка двигателей при превышении допустимой нагрузки на электросамокат, приводящая к температурному перегреву эмалированной изоляции обмоток; попадание песка и влаги внутрь конструкции; размагничивание магнитов при температурной перегрузке.

Таким образом, разработка метода обнаружения дефектов обмоток с эмалированной изоляцией бесколлекторного двигателя на основе частотного анализа обмоток BLDC-приводов является актуальной задачей в связи с их массовым применением.

Методы и технические средства

В качестве BLDC-двигателей были использованы наиболее широко применяемый в последнее время на транспорте электродвигатель номинальной мощностью 350 Вт и привод плоттера 125 Вт.

Технология обнаружения неисправностей BLDC-двигателей с использованием импедансной и фазочастотной характеристик, описанная в данном исследовании, является развитием методики [4], где с помощью метода «трех вольтметров» рассчитывается модуль и аргумент комплексного сопротивления в режиме холостого хода (XX), в диапазоне частот от 0 до 100 кГц, и для обнаружения коротких замыканий сравниваются частотные характеристики BLDC-двигателей в дефектном и бездефектном состоянии.

При выполнении экспериментов применялось следующее оборудование и приборы: вольтметры В7-68, задающий генератор сигналов ГЗ-112, автоматизированная информационно-измерительная система на основе разработанного программного обеспечения для графического представления результатов с управлением от персонального компьютера (ПК).

В исследуемых двигателях искусственно были созданы повреждения эмалевой изоляции явнополусной в виде отпаяк от различного числа витков явнополусной обмотки (15, 50 и 100 % витков одной из девяти катушек, приходящихся на одну фазу привода мопеда), имитирующие межвитковое короткое замыкание (МКЗ). Контролируемое управление режимами МКЗ (включение, отключение, переключение на различное число витков) осуществлялось с помощью реле, закрепленного на подшипниковой крышке.

Полученные результаты обрабатывали на ПК с помощью специально разработанной программы и строили частотные характеристики, используемые для дальнейшего анализа дефектов.

Измерения осуществляли путём подключения к фазному проводу и выводу нулевой точки. Результаты импедансных характеристик для бездефектного состояния BLDC-двигателя электромопеда представлены на рисунке 1.

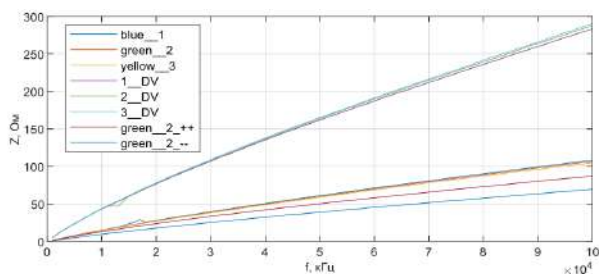


Рисунок 1 – Импедансная характеристика для бездефектного состояния BLDC-двигателей в случае способа подключения к фазному проводу и корпусу:

blue, green, yellow – три фазных провода привода мопеда без магнитов;
1 DV, 2 DV, 3 DV – привод плоттера без магнитов; green 2++, green – двигатель мопеда с магнитами в согласованном и рассогласованном положениях соответственно

Результаты исследований и их обсуждение

В отличие от импедансных характеристик трехфазных трансформаторов и асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором [5, 6] магнитные связи между обмотками и фазами BLDS-двигателей незначительны, что проявляется в отсутствии первого и второго резонансов.

Характер зависимостей более характерен для индуктивного элемента со слабой магнитной связью. Причем в собранном с подвижными магнитами положении импеданс значительно уменьшается, а согласованное и рассогласованное положение магнитов относительно измеряемой фазы оказывает примерно такое же влияние, как и само наличие магнитов. Импедансная характеристика двигателя плоттера проходит намного выше, что связано с большими активным сопротивлением и индуктивностью. Было установлено, что если выполнять анализ на более высокой частоте (например, 100 кГц), то различия проявляются более значительно (см. рисунок 1).

Из рисунка 2 следует, что при МКЗ наблюдается снижение импеданса, причём на большей частоте различия проявляются более отчетливо. Результаты исследования импедансных характеристик для бездефектного состояния и при различном числе закороченных витков обмотки двигателя мопеда представлены на рисунке 3.

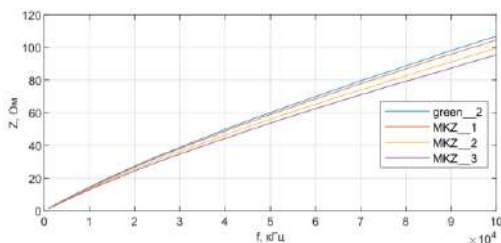


Рисунок 2 – Импедансная характеристика для МКЗ для привода мопеда без магнитов: 2 (green) – бездефектное состояние; MKZ 1, MKZ 2, MKZ 3 – короткое замыкание соответственно 15, 50, 100 % всех витков одной из 9 катушек

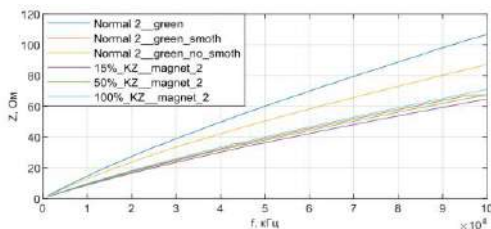


Рисунок 3 – Импедансная характеристика в случае МКЗ для двигателя мопеда: Normal 2 green – бездефектное состояние; Normal 2 green smooth – согласованное положение магнита; Normal 2 green no smooth – рассогласованное положение магнита; KZ 15 %, KZ 50 %, KZ 100 – КЗ 15, 50, 100 % витков одной из 9 катушек соответственно

На основании проведённых исследований можно сделать вывод, что импедансную характеристику целесообразно измерять без подвижной части с магнитами (разобранное состояние) на большой частоте (≥ 100 кГц), так как в этом случае влияние положения магнитов отсутствует и различия для дефектного и бездефектного состояний проявляются более отчетливо. Полученные результаты являются основой для создания методики и программно-аппаратного комплекса диагностики дефектов обмоток BLDC-двигателей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 **Schagin, A. V.** Development of Speed Control System for BLDC Motor with Power Factor Correction / A. V. Schagin, D. T. Nguyen // 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), St. Petersburg and Moscow, Russia. – 2020. – P. 2411–2414. – DOI: 10.1109/EIConRus49466.2020.9038981.

2 **Purnalal, M.** Development of mathematical model and speed control of BLDC motor / M. Purnalal, T. K. Sunil kumar // International Journal of Electrical and Electronics Engineers IJEEE. – 2015. – Vol. 07, is. 01. – P. 271–280.

3 **Obulesh, Y.** Mathematical modeling of bldc motor with closed loop speed control using pid controller under various loading conditions / Y. Obulesh, Ch. Sai Babu, A. Purna Chandra Rao // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2012. – Vol. 7 (10). – P. 1321–1328.

4 **Галушко, В. Н.** Метод неразрушающего контроля состояния однофазных и трёхфазных трансформаторов на основе частотных характеристик / В. Н. Галушко И. Л. Громыко // Приборы и методы измерений. – 2025. – Т. 16, № 2. – С. 158–167. – DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-158-167.

5 **Мирош, Д. В.** Технология применения нейронных сетей для диагностики межвитковых замыканий в трансформаторах и асинхронных двигателях / Д. В. Мирош, В. М. Овчинников, И. Е. Монархович // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: наука и транспорт. – 2024. – № 1(48). – С. 24–29.

6 **Исаев, А. В.** Спектрально-импульсные методы измерения сопротивления межвитковой изоляции электрических машин со выпной обмоткой и приборы на их основе : дисс. канд. техн. наук : 05.11.01 / А. В. Исаев; БНТУ. – Минск, 2024. – 140 с.

Получено 19.05.2026

ISSN 2227-1155. Сборник студенческих научных работ.
Вып. 31. Гомель, 2026

УДК 656.015

С. И. МОЛЧАН, Н. В. ЗАКРЕВСКИЙ (УД-21)

Научный руководитель – канд. техн. наук *Е. Н. ПОТЫЛКИН*

ПРОБЛЕМА И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МУЛЬТИМОДАЛЬНЫХ ТЕРМИНАЛОВ

Рассматриваются проблемы и перспективы развития мультимодальных терминалов как основных элементов транспортного комплекса. Выявлены основные си-