

Уровни доверительной вероятности могут быть повышены исходя из фактической оценки рисков на объекте. Необходимо помнить, что необоснованное завышение уровней доверительной вероятности приводит к перерасходу материальных и финансовых средств в целом на осветительную электросеть, так как жесткие ограничения количества защищаемых осветительных приборов одним автоматическим выключателем может привести к необходимости увеличения как самих аппаратов защиты, так и линий электропередачи.

Список литературы

1 ГОСТ IEC 60050-441-2015. Международный электротехнический словарь. Часть 441. Аппаратура коммутационная, аппаратура управления и плавкие предохранители (IEC 60060-441:1984, Amd 1:2000, IDT) – Введ. 01.05.2017. – URL: <https://megaport.ru/Data2/1/4293758/4293758679.pdf> (дата обращения: 07.06.2025).

2 Пономарев, Д. В. Пусковые токи led-драйверов, их значение и измерение / Д. В. Пономарев / ООО «ПТК "АРГОС-ЭЛЕКТРОН"». – URL: https://argos-electron.ru/news/puskovye_toki_led_drayverov_ikh_znachenie_i_izmerenie/ (дата обращения: 07.06.2025).

3 ПНСТ 639-2022/МЭК 63129:2020. Светотехнические изделия. Методы измерения пусковых токов. – Введ. 28.02.2022. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200183404> (дата обращения: 07.06.2025).

УДК 621.3

МЕТОД ОБНАРУЖЕНИЯ КОРОТКОЗАМКНУТЫХ ВИТКОВ В ОБМОТКАХ ТРАНСФОРМАТОРОВ И АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ЧАСТОТНОГО АНАЛИЗА

Д. В. ЕРМОЛЕНКО, В. Н. ГАЛУШКО

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

В настоящее время большая часть трансформаторов системы электроснабжения Республики Беларусь и асинхронных двигателей (АД) отработали установленный срок службы. Многие из таких трансформаторов и АД могли бы эксплуатироваться еще длительное время, однако в этом случае должны предъявляться повышенные требования к методам диагностики их технического состояния.

В настоящее время перспективным методом диагностики состояния трансформатора является метод частотных характеристик (FRA). Использование частотной характеристики для диагностики трансформатора было описано в статье [2]. Данный метод заключается в сравнении «фазовых портретов» трансформатора при различных технических состояниях. Однако данный метод не позволяет определить ни протяженность повреждения, ни его тип, поэтому нуждается в дальнейшей доработке.

Используя различные измерители иммитанса (например, Е7-30 или НМ8118), можно непосредственно получить амплитудно-частотные (импедансные) $Z(\omega)$ и фазочастотные $\varphi(\omega)$ характеристики трансформаторов. При отсутствии таких приборов на практике можно использовать различные косвенные методы определения комплексных сопротивлений (или проводимостей) для каждой частотной составляющей сигнала с учетом их результирующей погрешности измерений.

Для проведения частотного анализа, был использован метод трех вольтметров, подробно описанный в статье [1].

Для построения частотных характеристик используются четыре мультиметра В7-68 (один используется как частотомер, а другие – как вольтметры), задающий генератор сигналов ГЗ-112 и резистор r на 4,5 Ом.

С помощью магазина измерительных сопротивлений выполнялось изменение сопротивления в широких пределах: от 0,1 Ом до 100 кОм для имитации различного состояния обмоток (МКЗ, межфазном КЗ) и сердечника. Эксперименты с трансформаторами проводились в лаборатории кафедры электротехники Белорусского государственного университета транспорта.

При разработке универсальной диагностической системы необходимо учитывать не только данный фактор, но и разброс в значениях по каждой из фаз. Поэтому если исходное измерение частотных характеристик отдельных фаз исследуемого трансформатора отсутствует, то можно

выполнить сравнение с частотной характеристикой, полученной на другом трансформаторе той же серии (изготовленном по тем же чертежам и тем же заводом-изготовителем). Следует отметить, из-за возможных отличий в конструкции обмоток даже в случае одного завода-изготовителя (например, модернизации серии), в том числе для однотипных трансформаторов, результаты экспериментов частотных характеристик могут отличаться.

1 Трансформатор. Полученные изображения могут использоваться после нормировки в качестве исходных данных для искусственных нейронных сетей. Особое внимание требуется уделить таким факторам в порядке их значимости, как форма фазовых характеристик, амплитуды резонансов, смещения резонансных частот и число резонансов, связав их с требуемой детализацией при классификации неисправностей.

На основании экспериментов можно сделать следующие выводы:

- наиболее значимые изменения присущи первому «резонансу» до достижения частоты 50 кГц;
- амплитуда первого «резонанса» импедансных характеристик снижается по мере уменьшения сопротивления между фазами до наступления полного межфазного КЗ;
- фазочастотные характеристики отличаются значимым изменением формы кривой и сдвигом частоты в большую сторону для первого «резонанса»;
- характер изменения фазочастотных характеристик отличается снижением фазы первого «резонанса» до 5 кОм, а затем увеличением емкостной составляющей до нескольких Ом при межфазном КЗ.

Сравнительный частотный анализ межфазного КЗ и межвиткового КЗ трансформатора указывает на следующие отличия:

- для межвиткового КЗ наблюдается значительный сдвиг первой резонансной частоты импедансной характеристики;
- форма фазочастотных характеристик значительно отличается;
- для фазочастотной характеристики регистрируется классификационный диапазон на частотах 75–90 кГц.

2 Асинхронный двигатель. Для получения входных параметров для нейронной сети для метода обнаружения короткозамкнутых витков при работе под нагрузкой использовались энергометры, а на основе частотных характеристик при МКЗ, МФЗ, дефектах сердечника и обмотки короткозамкнутого ротора, а также повреждениях подшипников использовались метод трех вольтметров или частотомер.

Определение неисправностей подшипников основано на использовании вибродиаграмм при контроле вибрации колесно-моторных блоков локомотивов с помощью виброанализатора СД-21.

На основании импедансных характеристик (рисунок 1) при МКЗ для АД с КЗР можно сформулировать следующие выводы:

- для неповрежденных фаз (в наших экспериментах для удобства представления А и С) происходит уменьшение частоты первого «резонанса»;
- для поврежденной фазы (В) происходит снижение амплитуды первого «резонанса».

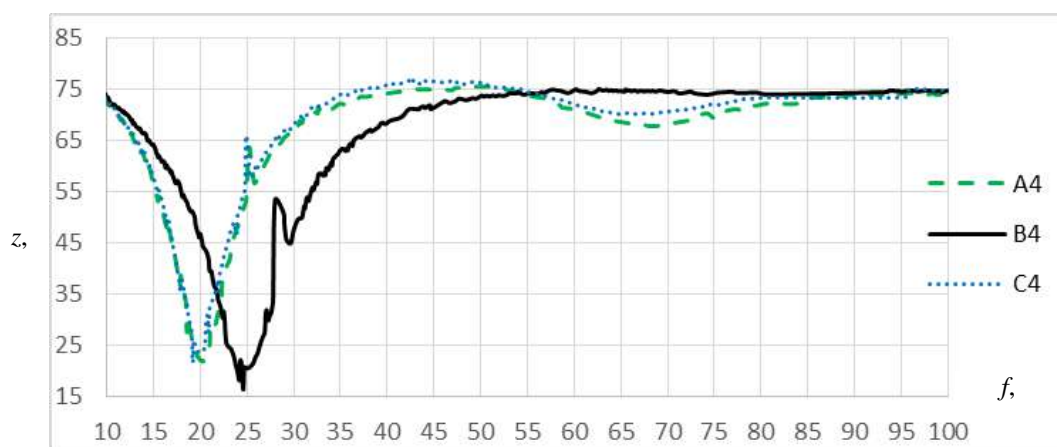


Рисунок 1 – Фазочастотные характеристики при МКЗ фазы В АД

Алгоритм обнаружения поврежденной обмотки и оценки степени повреждения с помощью импедансных и фазочастотных характеристик АД с КЗР – снижение амплитуды импедансной и увеличение частоты первого «резонанса» фазочастотной характеристик.

На основании приведенных результатов измерений наиболее распространенных повреждений или направленности развития неисправностей изоляции обмоток и состояния сердечника наибольшие изменения в импедансных и фазочастотных характеристиках связаны со следующими параметрами: амплитудой первого «резонанса» импедансных характеристик и сдвигом его частоты; формой фазочастотных характеристик.

Сравнительный анализ частотных характеристик однофазных и трехфазных трансформаторов, а также для АД при диагностировании предотказных состояний и отказов авторы используют в качестве основы при создании универсальной диагностической системы определения и классификации неисправностей на основе сверточных нейронных сетей. В результатах работы могут быть заинтересованы энергетические предприятия Республики Беларусь.

Список литературы

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

УДК 621.332:625.42

ВЫПОЛНЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ НА ТОКОПРИЕМНИКЕ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА МЕТРОПОЛИТЕНА

В. А. ЗАГОРЦЕВ, О. С. АНАНЬЕВА

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

С развитием железнодорожного транспорта и, в частности, в связи с электрификацией участков железных дорог возникла потребность в определении весовых норм грузовых поездов, формировании графиков движения, выполнении требований безопасности движения, а также другие значимые вопросы. В процессе поиска ответов возникла дисциплина «Теория локомотивной тяги», результатом деятельности которой стали «Правила тяговых расчетов».

При электрификации железных дорог, а также городского транспорта необходимо выполнение электрических расчетов, целью которых является выбор основных элементов системы тягового электроснабжения (СТЭ). Для определения нагрузки этих элементов необходимы тяговые расчеты для планируемых к эксплуатации типов электроподвижного состава как грузового, так и пассажирского, особенно в случае высокоскоростного пассажирского движения. Итоговый результат тяговых расчетов, необходимый для выполнения электрических – это зависимость тока поезда от его относительной координаты. На основании этих данных для заданных типов поездов, формируется необходимый график их движения по электрифицируемому участку и определяются нагрузки элементов СТЭ.

При выполнении тяговых расчетов ток поезда в общем случае определяется его скоростной характеристикой (зависимостью тока поезда, от скорости его движения), которая приводится для некоторого «номинального значения напряжения» на токоприемнике электрического локомотива, например, 25000 В (50 Гц) переменного или 3000 В постоянного тока для электрифицированных железных дорог, или 750 В постоянного тока – для моторвагонного подвижного состава метрополитена. При этом на практике уровень напряжения на токоприемнике изменяется в широких пределах, в зависимости от величины нагрузки СТЭ и режимов работы электроподвижного состава.

Поезд, двигаясь по перегону, преодолевает силы сопротивления движению, то есть расходует определенную электрическую мощность, которая на постоянном токе будет определяться текущим режимом движения (величиной потребления тока) и уровнем напряжения на токоприемнике. В зависимости от типа привода (коллекторный постоянного тока или асинхронный) влияние изменения напряжения на токоприемнике локомотива на его параметры будут отличаться: для коллекторного привода уменьшение уровня напряжения приводит к снижению скорости движения на текущей позиции контроллера машиниста, тогда как для асинхронного тягового привода, в котором используются