

УДК 629.11:621.333

Анализ электрических показателей работы тягового электродвигателя троллейбуса

А. Б. Власов, С. А. Бувев*, В. В. Кучеренко, В. И. Урванцев

*Мурманский государственный технический университет, г. Мурманск, Россия;

e-mail: buevsa@mstu.edu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7279-1065>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
17.11.2022;

получена
после доработки
22.11.2022

Ключевые слова:

троллейбус,
тяговый
электродвигатель,
электрооборудование,
тяговый
преобразователь,
качество
электрической
энергии,
гармоники,
количественная
термографическая
диагностика

Техническая оснащенность современных троллейбусов (увеличенная мощность тяговых двигателей, рекуперативно-реостатное торможение, противобуксочная и антиблокировочная системы, бортовой компьютер для контроля и управления работой тягового привода, спутниковые системы ГЛОНАСС, доступ в сеть Интернет) повышает требования к качеству электрической энергии и учету электромагнитной совместимости установленного оборудования. В ходе исследования проанализированы электрические показатели работы тягового асинхронного двигателя троллейбуса (значения напряжения, тока, форма синусоидальности напряжения, суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения). В связи с трудностями в поставках иностранного электрооборудования, прежде всего элементов силовой электроники, которые используются в управлении работой тягового двигателя, возрастает необходимость в совершенствовании мероприятий по техническому обслуживанию троллейбусов для увеличения надежности и срока безотказной работы оборудования. Экспериментально установлены преимущества использования методов количественной термографии, анализа качества электрической энергии и контроля твердости кабельной изоляции. С помощью анализатора качества электрической энергии выполнялись измерения количественных показателей работы электродвигателя; тепловизор применялся для оценки теплового состояния контактных соединений и кабельных трасс. Применение новых методов диагностики приобретает особую актуальность в ходе непрерывной длительной эксплуатации электротранспорта в условиях Крайнего Севера.

Для цитирования

Власов А. Б. и др. Анализ электрических показателей работы тягового электродвигателя троллейбуса. Вестник МГТУ. 2022. Т. 25, № 4. С. 334–344. DOI: 10.21443/1560-9278-2022-25-4-334-344.

Analysis of the traction motor electrical parameters of the trolleybus

Anatoly B. Vlasov, Sergey A. Buev*, Vladimir V. Kucherenko, Victor I. Urvantsev

*Murmansk State Technical University, Murmansk, Russia;

e-mail: buevsa@mstu.edu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7279-1065>

Article info

Abstract

Received
17.11.2022;

received
in revised
22.11.2022

Key words:

trolleybus,
traction motor,
electrical equipment,
traction inverter
electrical energy
quality
harmonics
thermal
imaging audit

The technical equipment of modern trolleybuses (increased power of traction motors, regenerative-rheostatic braking, anti-slip and anti-lock systems, an on-board computer for monitoring and controlling the operation of the traction drive, GLONASS satellite systems, Internet access) increases the requirements for the quality of electrical energy and the electromagnetic compatibility of the installed equipment. In the course of the study, the electrical performance of the trolleybus traction asynchronous motor (voltage, current, voltage sinusoidal shape, total coefficient of harmonic voltage components) has been analyzed. Due to difficulties in the supply of foreign electrical equipment, primarily power electronics elements used to control the operation of the traction motor, there is an increasing need to improve measures for the maintenance of trolleybuses to increase the reliability and uptime of the equipment. The advantages of using the methods of quantitative thermography, analysis of the quality of electrical energy and control of the hardness of cable insulation have been experimentally established. With the help of an analyzer of electric energy quality, measurements of the quantitative indicators of the operation of the electric motor have been carried out; the thermal imager has been used to assess the thermal state of contact connections and cable routes. The use of new diagnostic methods is of particular relevance in the course of continuous long-term operation of electric transport in the Far North.

For citation

Vlasov A. et al. 2022. Analysis of the traction motor electrical parameters of the trolleybus. *Vestnik of MSTU*, 25(4), pp. 334–344. (In Russ.) DOI: 10.21443/1560-9278-2022-25-4-334-344.

Введение

Первые российские троллейбусы типа ЛК, построенные коллективами завода "Динамо", Ярославского автомобильного завода, Московского автомобильного завода и Научного автотракторного института (НАТИ), появились в Москве в 1933 г. (*Шнейберг и др., 1999*). В процессе совершенствования процесса управления тяговым электродвигателем реостатно-контакторная система постоянного тока заменена тиристорно-импульсной системой. В настоящее время производители выпускают троллейбусы с системой управления на основе силовых транзисторов IGBT (БТИЗ)¹.

Проведенные испытания показали, что асинхронные тяговые двигатели на транзисторной системе управления более экономичны по потреблению электроэнергии. Двигатель постоянного тока ДК-211БМ потребляет 87 кВт/ч, а асинхронный двигатель ТАД-280Л4 – 83 кВт/ч (*Родионов, 2010*). Сокращение потребления электроэнергии также обусловлено возможностью забора энергии обратно в контактную сеть при торможении троллейбуса. Помимо рекуперации энергии, при совместном торможении электродвигателем и рабочей тормозной системой уменьшается тормозной путь на 1,1 м, время торможения – на 0,2 с (при скорости 54 км/ч) (*Мазаник, 2014*).

Современные троллейбусы значительно отличаются от своих предшественников: увеличена мощность тяговых двигателей, обеспечено электродинамическое (рекуперативно-реостатное) торможение, имеются противобуксовочная и антиблокировочные системы (ABS, TCS)², установлен бортовой компьютер для контроля и управления работой тягового привода. Троллейбусы оборудуются спутниковыми системами ГЛОНАСС, для пассажиров обеспечивается доступ в сеть Интернет.

Подобная оснащённость современных троллейбусов повышает требования к качеству электрической энергии и требует учета электромагнитной совместимости установленного на борту оборудования.

Совершенствование мероприятий по техническому обслуживанию (ТО) связано с применением новых инструментальных методов диагностики для повышения показателей надежности оборудования. Метод инфракрасной термографии, предусмотренный РД 34.45-51.300-97 "Объем и нормы испытаний электрооборудования", применяется в ходе испытаний для оценки технического состояния электрооборудования. На многих предприятиях имеются тепловизоры, но они активно не применяются в целях диагностирования при проведении мероприятий технического обслуживания. Это объясняется необходимостью увеличения затрат на обучение и повышение квалификации сотрудников, а также отсутствием методов и алгоритмов диагностирования конкретного оборудования.

Для повышения мобильности троллейбуса (в частности, для объезда заторов и препятствий на дороге, проезда железнодорожных переездов) производят гибридные силовые приводы с применением тяговых аккумуляторных батарей, дизель-генераторов и емкостных накопителей (*Сафонов, 2012; Орлов 2013*). Воздушная контактная сеть состоит из секций, которые соединяются между собой перемычками (*Афанасьев, 1988*). Троллейбус при прохождении мест соединения секций или стрелочных узлов на некоторое время остается без питания, что увеличивает перегрузки и создает нестабильности в работе электрического оборудования в связи с возникающими в системе переходными процессами (*Тарнижевский и др., 1986*). Для повышения стабильности работы электрооборудования при аварийной потере напряжения используют суперконденсаторы (*Holyszko и др., 2021*).

В настоящее время в мире замечается повышение интереса к электротранспорту, что связано со стремлением понизить выбросы углекислого газа в атмосферу. Успехи инженеров компании Tesla в совершенствовании характеристик выпускаемых автомобилей подтверждают перспективность масштабного перехода на электрические средства транспорта в недалеком будущем. Так, на аккумуляторные батареи модели Model Y производитель дает гарантию 8 лет (или 200 000 км)³, что существенно повышает привлекательность электромобилей, так как гарантирует покупателю длительный срок службы аккумуляторов.

При техническом обслуживании троллейбусов предусмотрен большой перечень диагностических работ, однако определяющим фактором качества обслуживания является отказ или выход из строя оборудования, что обуславливает необходимость разработки новых методов диагностики для непрерывной длительной эксплуатации троллейбусного парка в условиях Крайнего Севера в Арктическом регионе Российской Федерации. В настоящем исследовании рассмотрены методы количественной термографии, анализа качества электрической энергии и контроля твердости кабельной изоляции, используемые для увеличения срока службы электрооборудования.

¹ БТИЗ – биполярный транзистор с изолированным затвором (IGBT, an insulated-gate bipolar transistor).

² ABS – an anti-lock braking system; TCS – a traction control system.

³ Автоконцерн "Тесла" (США). URL : <https://www.tesla.com/modely>.

Материалы и методы

Основными нормативными документами в российской электроэнергетике, устанавливающими гармонический состав напряжения и тока в системах электроснабжения общего пользования и промышленных предприятий, являются государственные стандарты по качеству электрической энергии (ГОСТ 32144-2013) и электромагнитной совместимости [ГОСТ Р 51317.2.4-2000 (МЭК 61000-2-4-94)].

Согласно ГОСТ 32144-2013 одним из важных показателей качества электрической энергии, относящихся к гармоническим составляющим напряжения, является показатель суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения [the total harmonic distortion voltage $THD(U)$] (Горелов и др., 2012; Кислов и др., 2021).

В электроэнергетике (в том числе в системе электротранспорта) используется иностранное электрооборудование, поэтому для обеспечения его безопасной эксплуатации рекомендуется оценивать характеристику напряжения, частоты и формы синусоидальности и гармонических составляющих напряжения также по европейскому стандарту EN 50160 (Кислов и др., 2021).

Согласно стандарту IEEE Std 519-2022 (США) для напряжений до 1 кВ установлена максимальная граница суммарного значения гармонических составляющих напряжения $THD(U) = 8\%$.

При снятии характеристик с асинхронных двигателей необходимо руководствоваться ГОСТ Р 50034-92.

В процессе определения электрических параметров работы электродвигателя применяются анализатор качества электрической энергии Power Master MI2892 и тепловизор Fluke Ti400 для получения термограмм контактных соединений и кабельных трасс.

Постановка задачи

В парке предприятия АО "Электротранспорт" в г. Мурманске используются троллейбусы различных производителей: завода транспортного машиностроения (г. Волгоград), "Белкоммунмаш" (г. Минск), "Транс-Альфа" (г. Вологда), "ТролЗа" (г. Энгельс Саратовской обл.), "КАМАЗ" (Республика Татарстан) и др.

Ежедневно перед выходом на маршрут троллейбусы проходят осмотр бригадой слесарей; ТО-1 выполняется один раз в неделю и более полное ТО-2 – раз в три месяца.

ТО-1 включает обязательные работы по контролю тока утечки; моечно-уборочные работы; инструментальную проверку узлов, обеспечивающих безопасность движения; проверку давления воздуха в шинах; сходжение управляемых колес; оценку эффективности действия рабочей и стояночной тормозных систем; определение удельного сопротивления движению троллейбуса⁴.

Основным назначением ТО-2 является выявление и предупреждение неисправностей в процессе своевременного выполнения контрольно-диагностических, крепежных, регулировочных, смазочных, очистительных и других видов работ, применяемых при оценке технического состояния транспортных средств.

Следует отметить, что отсутствие методов и алгоритмов диагностики электрооборудования сводит его обслуживание к визуальному осмотру и очистке доступных элементов. Применение современных диагностических приборов способствует совершенствованию работы по поиску неисправностей в электротехнических устройствах и кабельных трассах.

Применение методов количественной термографии связано с необходимостью выявления дефектов оборудования на ранней стадии их развития в рабочем режиме эксплуатации, что позволяет избежать аварийных ситуаций, приводящих к значительным экономическим потерям (Власов и др., 2019).

Тепловизор применяется для оценки теплового состояния контактных соединений и кабельных трасс непосредственно в процессе работы и эксплуатации. Тепловизионная диагностика может выступать как самостоятельный метод технической диагностики, требующий достаточно высокой квалификации оператора и эксперта. Однако, как показывает практика, наиболее эффективными являются комплексные испытания, в ходе которых исследуются многочисленные диагностические параметры, определяющие техническое состояние оборудования (Власов, 2006).

Для исследования параметров качества электроснабжения тягового электродвигателя выбран троллейбус марки ВМЗ-5298.01 завода "Транс-Альфа" (г. Вологда), функциональная схема которого представлена на рис. 1.

Электрооборудование троллейбуса можно условно разделить на основное, которое обеспечивает функционирование тягового электропривода, и дополнительное – для обеспечения работоспособности

⁴ Проект Правил технической эксплуатации транспортных средств городского наземного электрического транспорта при осуществлении перевозок пассажиров троллейбусами, трамваями. URL : <https://arm-ecogroup.ru /upload/iblock/f33/f33e06d0cce0f0aef41cb30498080d0.docx>.

вспомогательных систем (источники питания, отопления, освещения; наружная и внутренняя сигнализация; приводы компрессора и гидронасоса и т. д.).

Из схемы следует (рис. 1), что комплекс электрического оборудования троллейбуса включает высоковольтные электротехнические устройства напряжением 550 В (постоянного тока) и 380 В (переменного тока), низковольтные аппараты напряжением 24 В (постоянного тока).

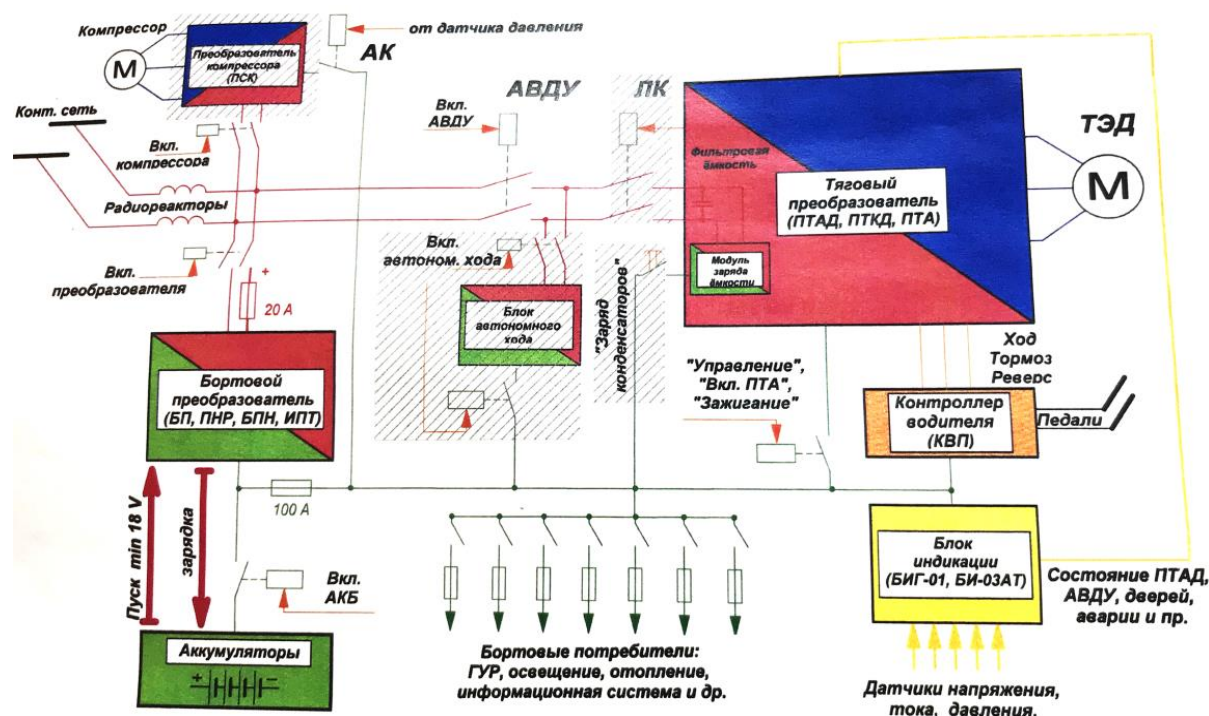


Рис. 1. Функциональная схема современного троллейбуса⁵: ПТАД – преобразователь тяговый асинхронного двигателя; ТЭД – тяговый электродвигатель; АВДУ – автоматический выключатель дистанционного управления

Fig. 1. Functional block diagram of a modern trolleybus: ПТАД (PTAD) – the asynchronous motor traction converter; ТЭД (TED) – the electric traction motor; АВДУ (AVDU) – the remote control circuit breaker

Тяговый электродвигатель расположен за задней ведущей осью троллейбуса в специальном отсеке по левой стороне (рис. 2)⁶. Большая часть тягового комплекта электрооборудования вынесена на крышу троллейбуса, часть его располагается в отсеке, находящемся в задней части троллейбуса. В качестве источника питания низковольтной системы применен статический полупроводниковый преобразователь, установленный на крыше и работающий совместно с необслуживаемой аккумуляторной батареей, находящейся в заднем отсеке троллейбуса. В конструкции троллейбуса применены асинхронный тяговый электродвигатель, транзисторный тяговый преобразователь, быстродействующий автоматический выключатель с дистанционным приводом, устройство контроля изоляции, регистратор электроэнергии, выключатель зажигания, аварийный выключатель, электронные маршрутные указатели, осуществлена блокировка хода троллейбуса при открытых дверях.

Постоянный электрический ток напряжением 550 В поступал из контактной сети в тяговый преобразователь ПТАД. Тяговый электродвигатель подключался по схеме соединения "звездой". В задней части троллейбуса (в месте контактных соединений) были закреплены гибкие токовые клещи А 1227 анализатора качества электрической энергии Metrel Power master.

Задний мост троллейбуса был "вывешен" на домкратах для имитации движения транспорта. Водитель занимал свое место и нажимал на пусковую педаль. Напряжение на обмотках электродвигателя возрастало,

⁵Функциональная схема современного троллейбуса выполнена начальником отдела ОАО "Электротранспорт" (г. Мурманск) О. В. Ключиковым.

⁶Данилов Э. Е. Троллейбус пассажирский низкопольный ТролЗа-5265 "Мегаполис" : рук-во по эксплуатации. Энгельс : ТролЗа, 2009. 109 с.

колеса раскручивались. Затем водитель отпустил пусковую педаль и нажал на педаль тормоза, колеса замедляли ход до полной остановки.

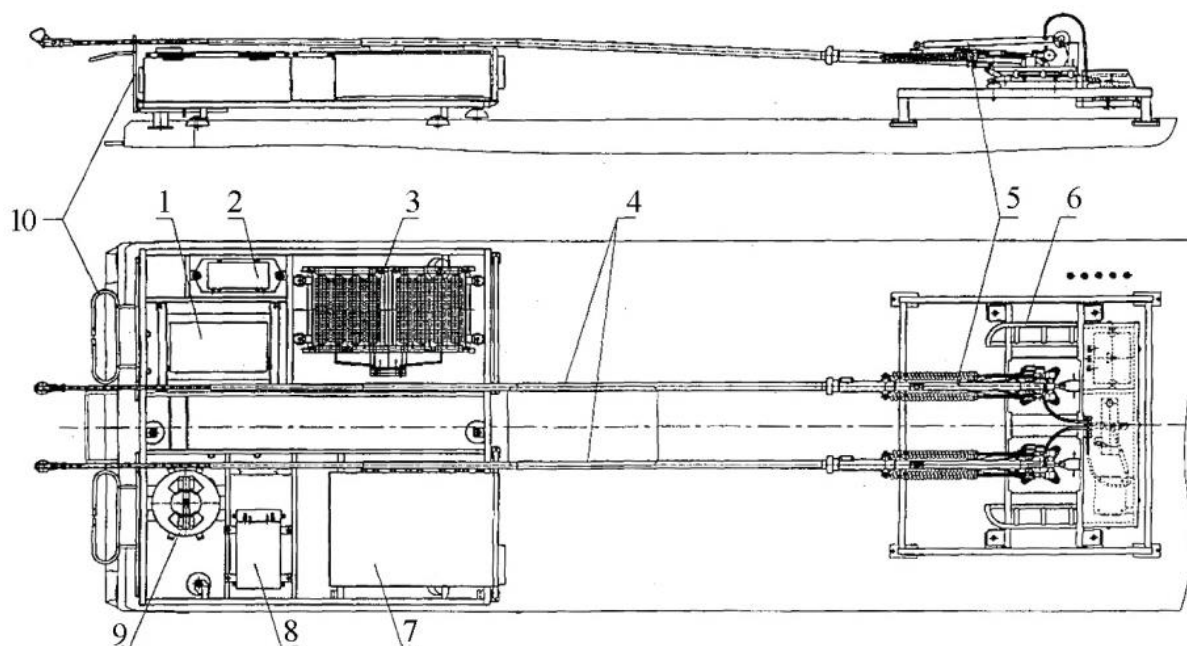


Рис. 2. Расположение электрооборудования на крыше троллейбуса: 1 – статический преобразователь; 2 – демпфер статического преобразователя; 3 – тормозные резисторы; 4 – токоприемники; 5 – гидравлический штангоуловитель; 6 – ограничитель токоприемников; 7 – тяговый преобразователь; 8 – быстродействующий выключатель; 9 – реактор помехоподавления; 10 – ограничитель хода штанг
 Fig. 2. Location of electrical equipment on the roof of the trolleybus

В процессе испытаний мгновенные значения напряжения и силы тока в цепи записывались в память прибора. Параллельно для анализа термического состояния кабельных сетей и контактных соединений производилась съемка с помощью тепловизора.

Результаты и обсуждение

Мгновенное изменение междуфазного напряжения на обмотках тягового электродвигателя с течением времени представлено на рис. 3. При нажатии водителем на пусковую педаль троллейбуса напряжение на обмотках возрастает до 300–400 В, после отпускания педали и нажатии тормоза – напряжение уменьшается до 50–100 В. На графике наблюдаем четыре подобных цикла набора мощности общей продолжительностью 20 с до остановки вращения колес, когда напряжение падает до нуля.

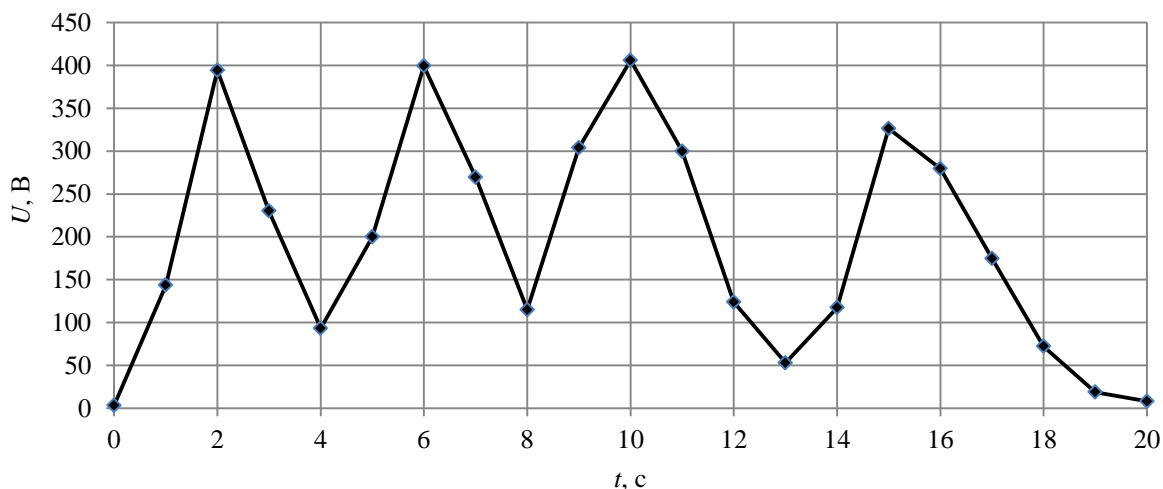


Рис. 3. Междуфазное напряжение на обмотках электродвигателя троллейбуса
 Fig. 3. Phase voltage on the electric motor winding of the trolleybus

Форма сигнала напряжения на каждой фазе в момент времени $t = 11$ с изображена на рис. 4. Видно, что в целом мгновенное напряжение имеет синусоидальную форму сигнала.

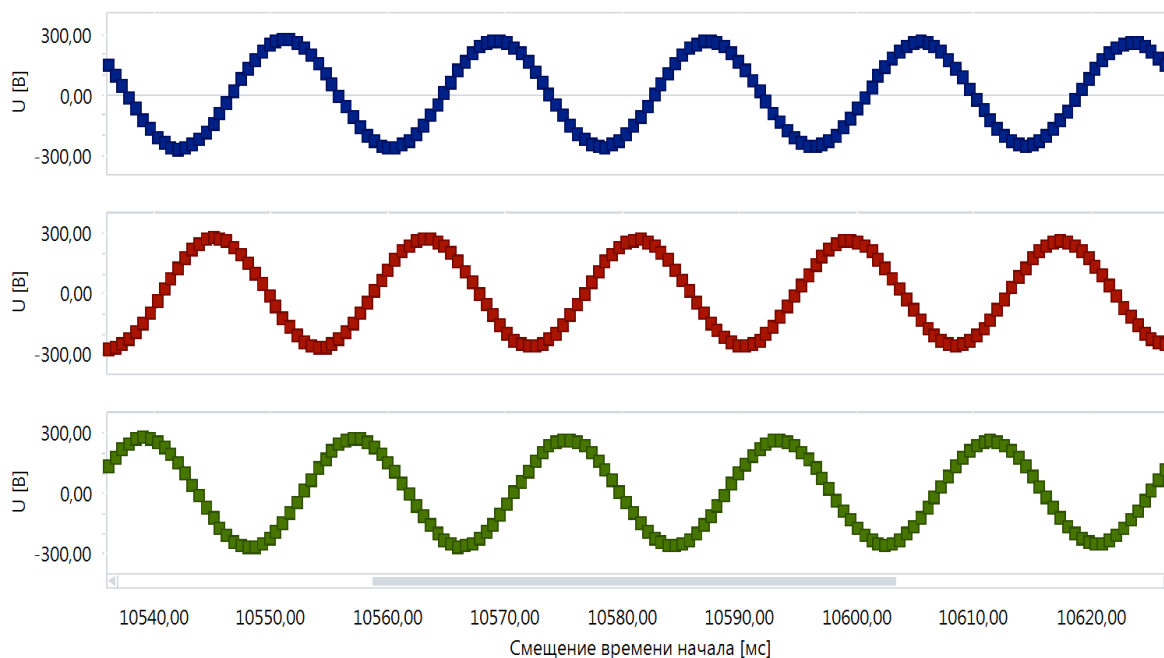


Рис. 4. Форма сигнала напряжения в момент времени $t = 11$ с
 Fig. 4. The voltage waveform at time $t = 11$ s

На графике (рис. 5) показана кривая значений суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения $THD(U)$ в различные моменты проведения измерений. Коэффициент рассчитывается как отношение среднеквадратического значения гармонических подгрупп к среднеквадратическому значению подгруппы, связанной с основной гармоникой:

$$THD(U) = \sqrt{\sum_{h=2}^{h=20} \left(\frac{U_{H,h}}{U_{H,1}} \right)^2}.$$

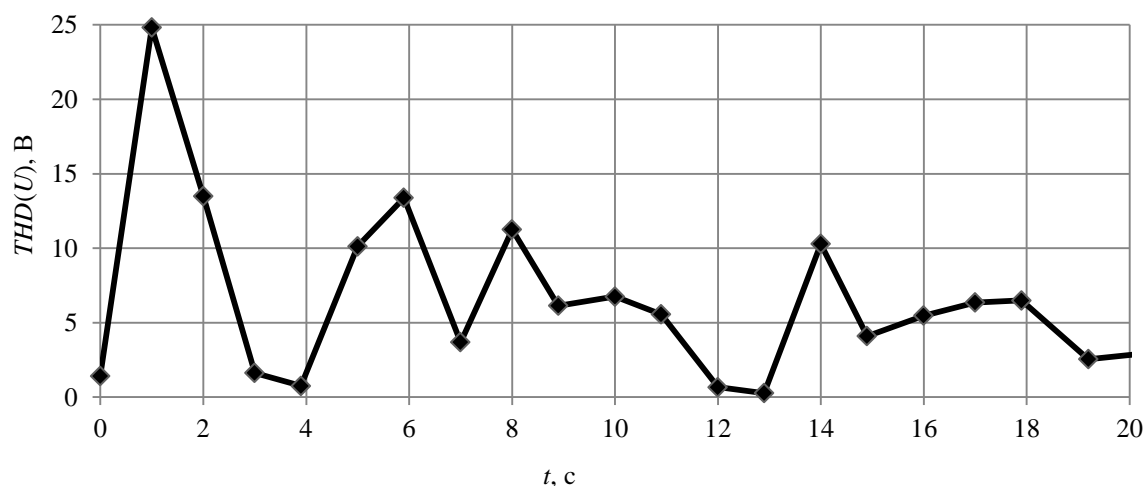


Рис. 5. Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения
 Fig. 5. Total voltage harmonic distortion

Как видно из графика, в режиме пуска электродвигателя наблюдается максимальное значение $THD(U) = 25$ В, что составляет около 6 % от мгновенного значения напряжения. В дальнейшем значение коэффициента $THD(U)$ уменьшается до 11–14 В.

Высокое значение $THD(U)$ в начале наблюдений можно объяснить резким набором мощности по сравнению с последующими циклами. Это предположение подтверждается данными, представленными на рис. 6. На графике изменения силы тока (фаза А) наблюдается максимальное значение тока в течение первых 3 с измерений.

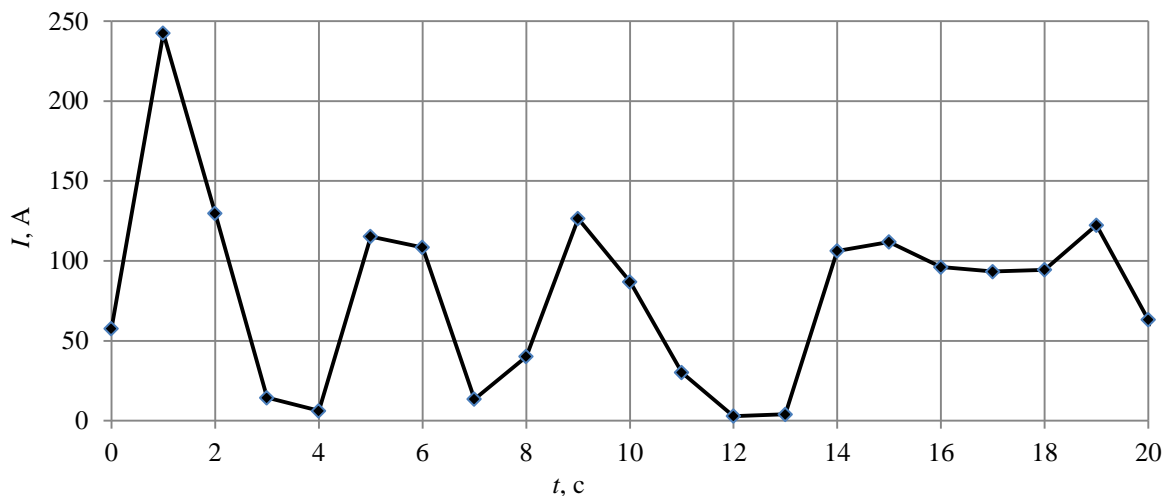


Рис. 6. Зависимость силы тока от времени (фаза А)

Fig. 6. Time current curve (phase A)

Для анализа электрических показателей работы асинхронного двигателя рассчитаны [аналогично расчету по соотношению для определения $THD(U)$] данные суммарного коэффициента гармонических составляющих тока (рис. 7). Значения $THD(I)$ достигают 12 % от значения тока, что является небезопасным показателем для весьма чувствительной релейной защиты и автоматики. Следует обратить внимание на тот факт, что, несмотря на изменение силы тока с 250 до 100 А (1–5 с испытаний), гармонические составляющие тока не уменьшились.

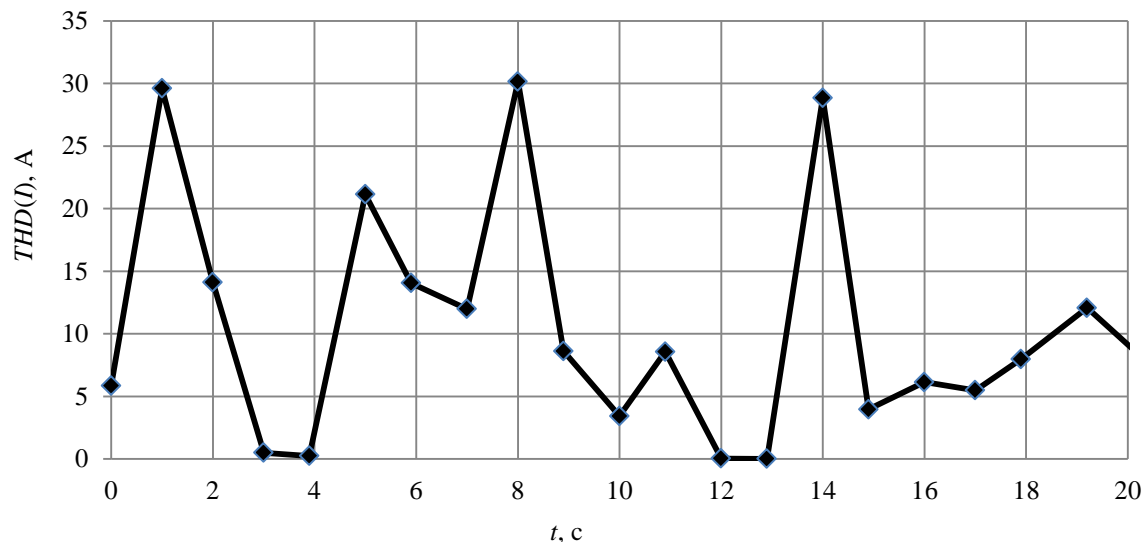


Рис. 7. Изменение суммарного коэффициента гармонических составляющих тока с течением времени

Fig. 7. The change of the total current harmonic distortion over time

Кратковременный и эпизодический подъем силы тока приводит к нарастанию тепловых градиентов, нагреву изоляции проводов и контактных соединений (КС). На термограмме (рис. 8) продемонстрирована возможность контроля температуры на контактных соединениях, питающих проводах электродвигателя. Термограмма сделана в момент подачи напряжения на двигатель, возрастания тока и, соответственно, повышения температуры как на КС, так и на проводах. Подобный режим работы (нагревание и остывание) приводит к преждевременному старению изоляции кабеля. В целях контроля за техническим состоянием

кабеля в процессе длительного старения целесообразно применять неразрушающий метод контроля твердости изоляции (Власов и др., 2020).

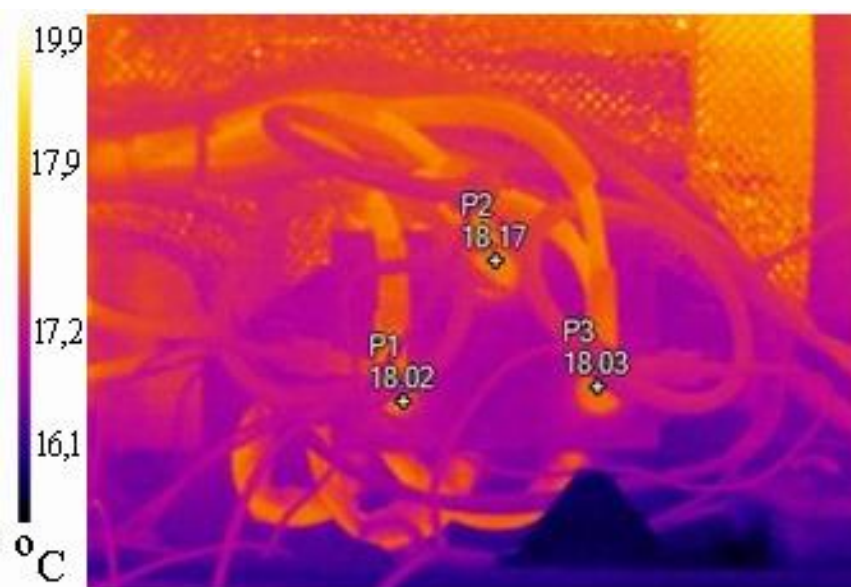


Рис. 8. Термограмма контактных соединений и проводов между тяговым преобразователем и асинхронным двигателем в кормовой части троллейбуса

Fig. 8. Thermogram of electrical connections and wires between traction converter and the induction motor in the aft part of the trolleybus

Заключение

Вопросы диагностики электрооборудования в настоящее время приобретают особую актуальность в связи с трудностями поставок иностранных комплектующих и силовой электроники. Существующие виды работ при ТО-1 и ТО-2 недостаточны, так как не включают мероприятия по контролю технического состояния электрооборудования.

Увеличение срока эксплуатации существующего оборудования достигается совершенствованием системы технического обслуживания; целесообразно применять новые инструментальные методы с использованием анализатора качества электрической энергии, тепловизора, современных способов оценки состояния изоляции кабельной сети.

Проведенные измерения гармонических составляющих напряжения и тока показали нестабильность электрических показателей работы асинхронного двигателя. Дальнейшие испытания необходимо выполнять с применением методик для оценки влияния качества электрической энергии на оборудование и метода подавления высших гармоник.

Проведение аналогичных испытаний в процессе динамических нагрузок на электродвигатель целесообразно осуществлять при полной загрузке троллейбуса в условиях разнообразного рельефа г. Мурманска.

Применение методов количественной термографии перспективно для оценки состояния изоляции кабельных трасс троллейбуса, увеличения срока безотказной работы электрооборудования, уменьшения тепловых потерь в процессе эксплуатации и увеличения КПД асинхронного двигателя.

Благодарности

Авторы благодарят коллектив предприятия АО "Электротранспорт" (г. Мурманск) за помощь в организации исследования.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Афанасьев А. С. Контактные сети трамвая и троллейбуса. М. : Транспорт, 1988. 264 с.
Власов А. Б. Модели и методы термографической диагностики объектов энергетики. М. : Колос, 2006. 280 с. EDN: QMJMMN.
Власов А. Б., Аллюров К. Б. Особенности реализации метода количественной термографической диагностики при внедрении цифровых технологий // Вестник МГТУ. 2019. Т. 22, № 4. С. 484–495. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2019-22-4-484-495>. EDN: IFCZGZ.

- Власов А. Б., Був С. А. Оценка состояния судового кабеля посредством измерения характеристик его изоляции // Вестник МГТУ. 2020. Т. 23, № 4. С. 335–344. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2020-23-4-335-344>. EDN: AQDPWI.
- Горелов Ю. И., Авдошин В. С. Высшие гармоники в сетях электроснабжения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2012. Вып. 12, ч. 3. С. 11–16. EDN: SAGJWT.
- Кислов А. А., Смирнова Т. В., Хухрянкин Г. В., Крюков О. В. Нормирование гармонического состава напряжения и тока для узлов нагрузки системы электроснабжения // Автоматизация и ИТ в энергетике. 2021. № 8(145). С. 24–28. EDN: ZEESYL.
- Мазаник К. И. Математическое моделирование динамики торможения двухосного троллейбуса // Системный анализ и прикладная информатика. 2014. № 4. С. 39–43. EDN: UGRLOL.
- Орлов В. А. Трамваи и троллейбусы без внешнего питания // Мир транспорта. 2013. № 4. С. 52–57. EDN: RTVZIJ.
- Родионов Р. В. Исследование тягово-энергетических характеристик приводов городского электрического транспорта // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2010. Вып. 3, ч. 3. С. 157–162. EDN: TBRZST.
- Сафонов А. И. Обоснование тяговой характеристики, проблема выбора электродвигателя и вспомогательных источников энергии троллейбуса // Вестник Белорусско-Российского университета. 2012. № 3 (36). С. 72–82. DOI: https://doi.org/10.53078/20778481_2012_3_72. EDN: PWAJFP.
- Тарнижевский М. В., Томлянович Д. К. Проектирование устройств электроснабжения трамвая и троллейбуса. М. : Транспорт, 1986. 375 с.
- Шнейберг Я. А., Веселовский О. Н., Демирчан К. С. [и др.]. История электротехники. М. : Изд-во МЭИ, 1999. 524 с.
- Hołyszko P., Zieliński D., Niewczas A., Rymarz J. [et al.]. Ensuring the continuity of power supply to the on-board auxiliary devices of the trolleybus through the recuperation of kinetic energy // Energies. 2021. Vol. 14, Iss. 16. Article number: 5035. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14165035>.

References

- Afanasyev, A. 1988. Tram and trolleybus contact networks. Moscow. (In Russ.)
- Vlasov, A. 2006. Models and methods of thermographic diagnostics of power engineering objects. Moscow. EDN: QMJMMN. (In Russ.)
- Vlasov, A. B., Alloyarov, K. B. 2019. Features of implementing the quantitative thermographic diagnostics method while introducing digital technology. *Vestnik of MSTU*, 22(4), pp. 484–495. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2019-22-4-484-495>. EDN: IFCZGZ. (In Russ.)
- Vlasov, A., Buev, S. 2020. The estimation of ship cable condition by the means of measuring its insulation characteristics. *Vestnik of MSTU*, 23(4), pp. 335–344. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2020-23-4-335-344>. EDN: AQDPWI. (In Russ.)
- Gorelov, Yu., Avdoshin, V. 2012. The higher harmonics in the power supply system. *Izvestiya Tula State University. Technical sciences*, 12(3), pp. 11–16. EDN: SAGJWT. (In Russ.)
- Kislov, A., Smirnova, T., Khukhriankin, G., Kryukov, O. 2021. Normalization of harmonic composition of voltage and current for nodes power supply loads. *Avtomatizatsiya i IT v energetike*, 8(145), pp. 24–28. EDN: ZEESYL. (In Russ.)
- Mazanik, K. 2014. Mathematical modeling of braking dynamics of a biaxial trolleybus. *System analysis and applied information science*, 4, pp. 39–43. EDN: UGRLOL. (In Russ.)
- Orlov, V. 2013. Trams and trolleybuses without external power supply. *World of Transport and Transportation*, 4, pp. 52–57. EDN: RTVZIJ. (In Russ.)
- Rodionov, R. 2010. Investigation of traction and energy characteristics of urban electric transport drives. *Izvestiya Tula State University. Technical sciences*, 3(3), pp. 157–162. EDN: TBRZST. (In Russ.)
- Safonov, A. 2012. Substantiation of traction characteristics, the problem of choosing an electric motor and auxiliary energy sources of a trolleybus. *The Belarusian-Russian University Herald*, 3(36), pp. 72–82. DOI: https://doi.org/10.53078/20778481_2012_3_72. EDN: PWAJFP. (In Russ.)
- Tarnizhevsky, M., Tomlyanovich, D. 1986. Design of tram and trolleybus power supply devices. Moscow. (In Russ.)
- Shneiberg, Ya. A., Veselovsky, O. N., Demirchan, K. S. et al. 1999. History of electrical engineering. Moscow. (In Russ.)
- Hołyszko, P., Zieliński, D., Niewczas, A., Rymarz, J. et al. 2021. Ensuring the continuity of power supply to the on-board auxiliary devices of the trolleybus through the recuperation of kinetic energy. *Energies*, 14(16). Article number: 5035. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14165035>.

Сведения об авторах

Власов Анатолий Борисович – ул. Спортивная, 13, г. Мурманск, Россия, 183010;
Мурманский государственный технический университет, д-р техн. наук, профессор;
e-mail: vlasovab@mstu.edu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5201-7654>

Anatoly B. Vlasov – 13 Sportivnaya Str., Murmansk, Russia, 183010;
Murmansk State Technical University, Dr Sci. (Engineering), Professor;
e-mail: vlasovab@mstu.edu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5201-7654>

Бувев Сергей Александрович – ул. Спортивная, 13, г. Мурманск, Россия, 183010;
Мурманский государственный технический университет, канд. техн. наук, доцент;
e-mail: buevsa@mstu.edu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7279-1065>

Sergey A. Buev – 13 Sportivnaya Str., Murmansk, Russia, 183010; Murmansk State Technical University,
Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor;
e-mail: buevsa@mstu.edu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7279-1065>

Кучеренко Владимир Владимирович – ул. Спортивная, 13, г. Мурманск, Россия, 183010;
Мурманский государственный технический университет, канд. техн. наук, доцент;
e-mail: kucherenkovv@mstu.edu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7279-1065>

Vladimir V. Kucherenko – 13 Sportivnaya Str., Murmansk, Russia, 183010;
Murmansk State Technical University, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor;
e-mail: kucherenkovv@mstu.edu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7279-1065>

Урванцев Виктор Иванович – ул. Спортивная, 13, г. Мурманск, Россия, 183010;
Мурманский государственный технический университет, доцент; e-mail: urvantsevvi@mstu.edu.ru

Victor I. Urvantsev – 13 Sportivnaya Str., Murmansk, Russia, 183010;
Murmansk State Technical University, Associate Professor; e-mail: urvantsevvi@mstu.edu.ru

Нормативные документы, использованные в статье

РД 153-34.0-20.363-99	Основные положения методики инфракрасной диагностики электрооборудования и ВЛ. URL : http://www.thermoview.ru/pdf/rd.pdf .
ГОСТ 32144-2013	Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. URL : https://docs.cntd.ru/document/1200104301 .
ГОСТ Р 51317.2.4-2000 (МЭК 61000-2-4-94)	Совместимость технических средств электромагнитная. Электромагнитная обстановка. Уровни электромагнитной совместимости для низкочастотных кондуктивных помех в системах электроснабжения промышленных предприятий. URL : https://rags.ru/gosts/gost/11081/ .
EN 50160	Voltage Characteristics in Public Distribution Systems (Характеристики напряжения в сетях общего пользования). International standard, 2004. URL : http://fs.gongkong.com/files/technicalData/201110/2011100922385600001.pdf .
IEEE Std 519-2022	Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems (Рекомендуемые требования к контролю гармонических составляющих в электрических сетях). URL : https://comsys.se/our-adf-technology/power-quality-ieee-519-2022 .
ГОСТ Р 50034-92	Совместимость технических средств электромагнитная. Двигатели асинхронные напряжением до 1 000 В. Нормы и методы испытаний на устойчивость к электромагнитным помехам. URL: https://rags.ru/gosts/gost/10052/ .