

Полученные результаты могут быть использованы при анализе энергоэффективности грузовых перевозок, а также для оценки сил, действующих на контейнеры, с целью подбора рациональных средств крепления.

#### Список литературы

- 1 Еловый, И. А. Развитие железнодорожных контейнерных перевозок в Республике Беларусь / И. А. Еловый, Е. В. Малиновский, С. А. Петрачков // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2018. – № 1 (36). – С. 58–60.
- 2 Paul, J. C. Application of CFD to Rail Car and Locomotive Aerodynamics / J. C. Paul, R. W. Johnson, R. G. Yates // The Aerodynamics of Heavy Vehicles II: Trucks, Buses, and Trains. Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics. – Berlin : Springer, 2009. – Vol. 41. – Pp. 259–297. – DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-540-85070-0\\_25](https://doi.org/10.1007/978-3-540-85070-0_25).
- 3 A field study on the aerodynamics of freight trains / A. Quazi, T. Crouch, J. Bell [et al.] // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 2021. – Vol. 209. – Article 104463.
- 4 Шимановский, А. О. Влияние направления воздушного потока на аэродинамические силы, действующие на транспортное средство / А. О. Шимановский, О. В. Демьянчук // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2025. – Т. 84, № 2. – С. 81–91.
- 5 Kedare, S. B. Computational fluid dynamics analysis of empty railway freight wagons / S. B. Kedare, S. C. Sharma, S. P. Harsha // International Journal of Vehicle Structures and Systems. – 2015. – Vol. 7, is. 1 – P. 25–30. – DOI: <https://doi.org/10.4273/ijvss.7.1.05>.
- 6 Effects of different aerodynamic configurations on crosswind stability of a conventional train / C. E. A. Reyes, D. Rocchi, G. Tomasini [et al.] // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 2023. – Vol. 242. – Article 105588.

УДК 621.3.014.3

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПУСКОВОГО ТОКА СВЕТОДИОДНЫХ СВЕТИЛЬНИКОВ ПРИ НЕПОЛНОТЕ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

*И. С. ЕВДАСЕВ*

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Пусковой ток (inrush current в терминах ИЕС 60050-448) – ток переходного процесса, связанный с подачей напряжения питания на электрическое оборудование (в российской версии этого документа используется термин «бросок тока» [1]). В задачах проектирования и эксплуатации электросетей и энергетических систем под пусковыми токами понимают только их часть, которая относится к сверхтокам, т. е. превышают номинальные токи оборудования. Оценка этих токов необходима для обеспечения надежности электроснабжения потребителей и недопущения неплановых отключений электросетей по причине ложных срабатываний аппаратов защиты.

Применительно к осветительным приборам характеристики пускового тока обусловлены несколькими различными физическими процессами и зависят от довольно большого числа факторов, включающих:

- а) вид источника света и пускорегулирующего аппарата;
- б) наличие емкостных элементов компенсации реактивной мощности, сдвига фаз или снижения пульсаций выпрямленного напряжения;
- в) сопротивления цепи питания;
- г) времени задержки включения от момента прохождения синусоиды переменного напряжения через нуль;
- д) другие факторы.

Все перечисленные факторы в практических задачах учесть крайне трудоемко, поэтому большей частью из них пренебрегают, а пусковой ток моделируют одиночными импульсами:

- 1) большой амплитуды от 10 до 250 кратности номинального тока, но короткими по продолжительности – меньше 0,01 с (рядом производителей автоматических выключателей принимается меньше 0,005 с по причине максимальной амплитуды импульса тока при включении осветительного прибора в момент максимума синусоиды напряжения);
- 2) относительно небольшой амплитуды от 1,1 до 1,6 (для светодиодных осветительных приборов до 2) кратности номинального тока с продолжительностью от сотых секунд до десятков минут, который представляет замену фактического периодического тока 50 Гц аperiодическим с равной работой за целое число периодов напряжения.

Первый тип импульсов характерен для изменения сопротивлений вольфрамовой нити накаливания, индуктивности пускорегулирующих аппаратов или заряда конденсаторов и моделируется с

учетом принципов работы электромагнитных расцепителей аппаратов защиты. Второй тип импульсов обусловлен нелинейным сопротивлением газового разряда или процессами при запуске преобразователя в электронном пускорегулирующем аппарате (обычно происходит с паузой после первого пускового импульса) [2], как правило, следует учитывать по тепловому воздействию на элементы электросети и аппараты защиты.

В практических задачах необходимо обратить внимание на объем информации по пусковому току, который может быть представлен производителем осветительных приборов на основе измерений. Согласно методике измерений ПНСТ 639-2022/МЭК 63129:2020 [3] пусковой ток осветительного прибора нормируется двумя величинами: пиковым значением импульса и длительностью по уровню 50 % от пикового значения.

Для импульсов второго типа, которые по длительности больше одного полупериода напряжения в электросети, значение пускового тока принимается равным пиковому значению импульса.

Как следствие отсутствия нормативных методик по определению пускового тока для коротких импульсов первого типа, в практических задачах приходится иметь дело с неполнотой исходной информации. В зависимости от объема принимаемых допущений ранжируем методики по степени снижения достоверности результата:

- 1) на основе зависимости ABB Group при известных значениях пикового тока и длительности импульса по уровню 50 %;
- 2) по статистической зависимости времени импульса от мощности осветительного прибора при известном значении пикового тока;
- 3) по статистической зависимости коэффициента пускового тока от мощности светодиодного осветительного прибора.

Методика на основе зависимости ABB Group (характеристике срабатывания модульных автоматических выключателей серии S200 от импульсных токов) довольно широко известна [2], поэтому на ней подробно останавливаться не будем.

В неблагоприятных вариантах при частичном или полном отсутствии информации о характеристиках импульса пускового тока от производителя осветительного прибора можно рекомендовать статистические зависимости, которые получены на основе выборки 250 серий электронных пускорегулирующих аппаратов (отдельные серии включают несколько моделей с идентичными характеристиками пускового и номинального токов) производства Mean Well, Tridonic, Inventronics, Sosen, Philips, Helvar, Moons'. Пример такой зависимости для случая полного отсутствия информации о характеристиках импульса пускового тока приведен на рисунке 1.

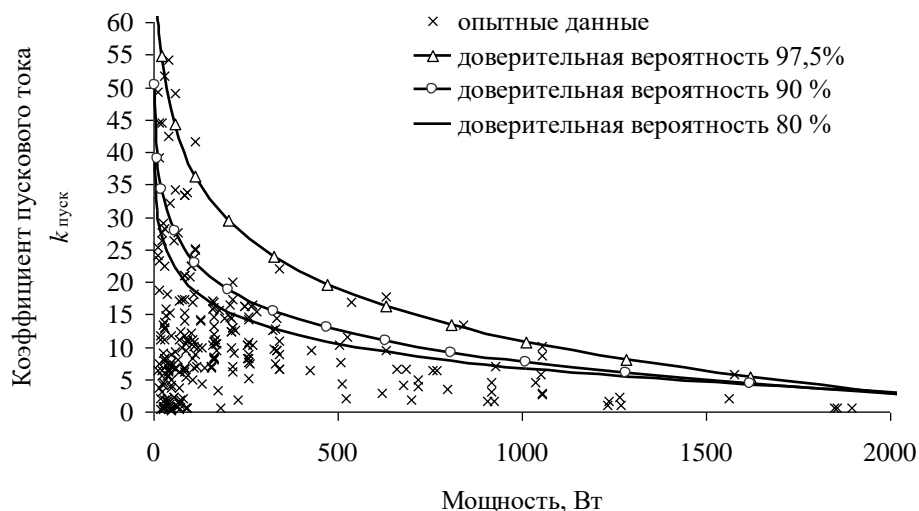


Рисунок 1 – Зависимость коэффициента пускового тока (отношения пускового тока к номинальному) от мощности светодиодного осветительного прибора

Выбор уровня доверительной вероятности зависит от потенциального риска при ложном срабатывании автоматического выключателя и отсутствии света на объекте в течение времени, которое необходимо для включения выключателя персоналом вручную. Для рабочего освещения целесообразно принимать уровень доверительной вероятности 70 или 80 %, а для аварийного освещения – 95 %.

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/](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