

На правах рукописи



Кагдин Алексей Николаевич

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
ПОДСТАНЦИЙ ГОРОДСКИХ И ПРОМЫШЛЕННЫХ СИСТЕМ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тамбов – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тамбовский государственный технический университет»

Научный руководитель: кандидат технических наук Кобелев Александр Викторович

Официальные оппоненты:

Виноградов Александр Владимирович, доктор технических наук, доцент, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», лаборатория электро- и энергосбережения и электробезопасности, ведущий научный сотрудник;

Бородин Максим Владимирович, кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Электроснабжение» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Орловский ГАУ»

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тульский государственный университет»

Защита диссертации состоится «10» июня 2022 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 212.108.01 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Липецкий государственный технический университет» по адресу: 398055, г. Липецк, Московская 30, первый корпус, ауд. 601.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте www.stu.lipetsk.ru при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Липецкий государственный технический университет».

Автореферат разослан «___» апреля 2022 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета



В.В. Телегин

ВВЕДЕНИЕ

Надёжность систем электроснабжения определяется надёжностью её отдельных элементов, в частности кабельных и воздушных линий, системой шин и шиноропроводов, работающих в различных режимах. Вопросы надёжности работы электротехнических устройств в условиях долговременных и, особенно, в кратковременных режимах приобретают все большее значения и сейчас остаются актуальными.

Актуальность работы. В настоящее время развитие предприятий промышленности относится к числу важнейших государственных приоритетов. Возведение конкурентоспособных прибыльных перерабатывающих предприятий невозможно без применения современных инновационных технологий, комплексной механизации и автоматизации производственных процессов, мощной энергетической базы.

В связи с этим, электроэнергетика производств должна решать следующие задачи:

- модернизация электрохозяйства промышленных предприятий с внедрением нового оборудования;
- внедрение энергосберегающих технологий и повышение качества электроэнергии;
- создание нового и реконструкция существующего электрооборудования, повышению надёжности и пропускной способности воздушных и кабельных линий;
- организация энергослужб, обеспечивающих увеличение объема и снижения себестоимости продукции, а также внедрение конструкторских и технологических разработок по созданию и реализации отдельных электротехнических и электронных устройств производственно-технологического и эксплуатационного назначения;
- создание предприятий по проведению капитальных ремонтов электрооборудования.

Проблемы электроснабжения в промышленной сфере стоят крайне остро. Большинство воздушных линий и трансформаторных подстанций, исчерпали свой ресурс и требуют замены. Например, появление гармоник тока вызывает увеличение его амплитуды в проводниках и трансформаторах, а резонансы на частотах гармоник вызывают перенапряжения на конденсаторах и в системе в целом. Кроме того, увеличение токов и напряжений в электрооборудовании часто связано с коммутационными процессами и реже с нарушением рабочего режима, в особенности при коротких замыканиях. В этом случае нарушается устойчивость работы сетей и пропускных шин из-за резкого увеличения мощности потока электромагнитной (ЭМ) энергии, который испытывает проводник за короткое время. Кроме того, технологические отверстия и геометрические неоднородности в проводниках усиливают эффект увеличения мощности потока ЭМ энергии именно в этих локальных областях. Зачастую, такой эффект концентрации ЭМ поля приводит к неустойчивой работе проводника, проводник теряет надёжность из-за резкого нагрева и возможного

теплового или пондеромоторного разрушения. Изучению устойчивости металлов при влиянии на них электрического тока посвящены работы М.С. Ершова, О.А. Троицкого, К.М. Климова, А. В. Лановой.

Цель работы. Повышение надежности и эффективности функционирования шинопроводов в условиях изменяющихся режимов работы городских систем электроснабжения

Идея работы заключается в разработке практических рекомендаций для монтажа шинопроводов на основе исследований геометрических неоднородностей на предмет изменяющегося коэффициента токовой интенсивности и его влияния на разрушение токопроводящих шин в аварийных режимах.

Задачи, которые ставились и выполнялись в ходе работы:

1. Экспериментально найти линии равных интенсивностей на плоском проводнике с изменяющейся геометрией и по степени интенсивности определить концентрацию электрического и магнитного полей на геометрически меняющихся неоднородностях.

2. Выявить критерии надежности шинопроводов по предлагаемым механизмам электромагнитного разрушения проводников и установить степень опасности эксплуатации токопроводящих шин при различных режимах работы электрических сетей.

3. Показать аналогию механического и электромагнитного разрушения проводника в зависимости от степени токовой интенсивности в шинопроводах с геометрическими неоднородностями.

4. Предложить практические рекомендации для различных режимов работы электрических сетей низкого напряжения в условиях изменяющейся токовой интенсивности по выявленным критериям надежности.

Объектом исследования являются шинопроводы распределительных устройств подстанций.

Предметом исследования является разрушение шинопроводов распределительных устройств подстанций под воздействием токовых нагрузок.

Методы исследования: методы теории электрического и магнитного полей, математического и программного моделирования, экспериментального подтверждения теории.

Научная новизна:

- Экспериментальными методами электромагнитного моделирования изучена токовая интенсивность на плоском проводнике с различными геометрическими неоднородностями. Физическим и математическим моделированием показано, что усиление тока может привести к началу локального электромагнитного разрушения проводника.

- Предложены критерии надежности шинопроводов по предлагаемым механизмам электромагнитного разрушения и установлена степень опасности эксплуатации токопроводящих шин при различных режимах работы электрических сетей. Аналитически найдены пороговые значения параметров тока, приводящие к потере устойчивости проводников.

- Показана механическая аналогия электромагнитного разрушения проводников, которая связывает критический коэффициент интенсивности механических напряжений и степень токовой интенсивности в шинопроводах, обусловленной геометрическими неоднородностями.

- Предложены практические рекомендации для различных режимов работы распределительных электрических сетей в условиях изменяющейся токовой интенсивности по выявленным критериям надежности.

Обоснованность и достоверность полученных результатов и выводов подтверждается соответствием теоретических исследований и расчетов, полученных аналитическим путем характеристик и зависимостей, результатов компьютерного моделирования, общими положениями теории электрического и магнитного полей.

Теоретическая значимость работы заключается в анализе токовой интенсивности в местах геометрических неоднородностей электрических шинопроводов.

Практическая ценность работы заключается в рекомендациях для различных режимов работы электрических сетей низкого напряжения в условиях изменяющейся токовой интенсивности по выявленным критериям надежности

Реализация результатов работы. Полученные в диссертационной работе результаты использованы в производственной деятельности компании АО "ОРЭС-ТАМБОВ" город Тамбов.

На защиту выносятся:

- Экспериментальные результаты по электромагнитному моделированию токовой интенсивности в плоском проводнике с различными геометрическими неоднородностями.

- Физические и математические модели по усилению токовой интенсивности вокруг геометрических неоднородностей, характеризующие начало локального электромагнитного разрушения шинопроводов.

- Критерии надежности шинопроводов, основанные на установленных механизмах локального электромагнитного разрушения и степени опасности эксплуатации токопроводящих шин при различных режимах работы электрических сетей.

- Аналитические результаты по пороговым значениям параметров тока, приводящим к потере устойчивости проводников.

- Сравнительный анализ механической аналогии электромагнитного разрушения проводников, который связывает критический коэффициент интенсивности механических напряжений и степень токовой интенсивности в шинопроводах, обусловленной геометрическими неоднородностями.

- Практические рекомендации для различных режимов работы распределительных электрических сетей низкого напряжения в условиях изменяющейся токовой интенсивности по предложенным критериям надежности.

Соответствие диссертации Паспорту научной специальности.

1. Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем.

2. Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях.

Апробация работы. Положения и основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: 2-ой Международной конференции с элементами научной школы «Актуальные проблемы энергосбережения и энергоэффективности в технических системах» (Тамбов. 2015 г.), Всероссийской заочной научно-практической конференции (Тамбов. 2017 г.), IV Международной научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов «Энергосбережение и эффективность в технических системах» (Тамбов. 2017 г.), 3-й Всероссийской студенческой научной конференции «Энергетика. Проблемы и перспективы развития» (Тамбов. 2017 г.), Международной научно-практической конференции «Инженерное обеспечение инновационных технологий в АПК» (Тамбов. 2017 г.), XIII Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 100-летию Кубанского государственного технологического университета (Армавир. 2018 г.), VI Международной научно-технической конференции студентов, молодых учёных и специалистов «Энергосбережение и эффективность в технических системах» (Тамбов. 2019 г.), IV Всероссийской молодежной научной конференции «Энергетика. Проблемы и перспективы развития» (Тамбов. 2019 г.), Всероссийской научной конференции «Цифровая трансформация в энергетике» (Тамбов. 2020 г.), Всероссийской научно-практической конференции «Энергетика будущего - цифровая трансформация» (Тамбов. 2021 г.)

Публикации. По теме диссертации опубликовано 17 печатных работ, 5 из которых – в центральных журналах, рекомендованных списком ВАК РФ, 1 – в трудах научной конференции, индексируемой в наукометрической базе Scopus.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, библиографического списка, включающего 88 наименований и 3 приложений. Общий объем диссертации – 120 страниц, в том числе 107 страниц основного текста, 33 рисунка, 13 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражена актуальность диссертационной работы, определен объект исследований, изложена цель и идея работы, поставлены задачи для ее достижения, показана научная новизна и практическая значимость работы, выделены основные выносимые на защиту положения, а также результаты апробации и реализации работы.

В первой главе выполнен информационный обзор работы элементов и оборудования электрических подстанций при различных режимах работы. Также были рассмотрены такие вопросы как импульсные нагрузки на проводник, история и современное положение вопроса, прочность и пластичность проводников, их разрушение в электромагнитном поле, влияние на проводник электрического тока и магнитного поля.

Устойчивость работы узлов нагрузки определяется колебанием токов и напряжений как от внутренних, так и от внешних возмущений.

На практике основными случаями потери устойчивости являются воздействия внешних возмущений. В среднем на долю случаев потери устойчивости промышленных электротехнических систем в результате воздействия внешних возмущений приходится от 60 до 80 % от общего числа случаев потери устойчивости. При этом кратковременные токи коротких замыканий могут увеличивать свою интенсивность в десятки раз из-за геометрических и технологических неоднородностей подводящих шинопроводов и шин распределительных устройств низкого напряжения на трансформаторных подстанциях.

Необходимо отметить, что проводник в таком режиме испытывает импульсные нагрузки и процесс электромагнитного разрушения следует рассматривать с позиций классической электродинамики.

Абсолютная величина электродинамического давления достигает предела текучести для мягких материалов технической чистоты (например, для алюминия и меди) при полях $(2-3) \cdot 10^7$ А/м. В поле напряженностью $8 \cdot 10^7$ А/м магнитное давление, равное 4 ГПа, намного превышает предел текучести самых твердых металлов и при длительности в несколько микросекунд достаточно для генерации ударных волн.

Таким образом, воздействие электромагнитного поля на проводник сопровождается широкой гаммой эффектов, которые так или иначе способны повлиять на прочность и разрушение металлов.

Во второй главе рассмотрены вопросы моделирования токовой интенсивности в шинах с геометрическими неоднородностями.

Рассмотрел математическую модель обтекания током непроводящего включения в виде вытянутого ортогонально токовому потоку эллипса в плоском проводнике прямоугольного сечения, моделирующим силовую шину

$$j(y) = j_0 \frac{R}{y}, \quad (1)$$

где j_0 - максимальная плотность тока на кромке эллипса с радиусом при его вершине a , а его длительность τ меньше характерного времени термической диффузии, равного R^2/K , где K - коэффициент температуропроводности и R - размер активной зоны вокруг вершины эллипса, в которой степень токовой интенсивности больше единицы, тогда,

$$I = h \int_R^B j_0 \frac{R}{y} dy = j_0 R h \ln \frac{B}{R}; \quad (2)$$

$$I = R h \ln \frac{B}{R} \sqrt{\frac{T_m c_p \rho \sigma}{\tau}}, \quad (3)$$

где h - толщина шинпровода; c_p - удельная теплоемкость; ρ - плотность материала проводника; σ - его электропроводность.

При больших значениях тока действует другой механизм разрушения активной зоны - испарение. Будем считать критерием разрушения при таких режимах достижение в материале теплосодержания, равного энергии сублимации L . Тогда плотность потока электромагнитной энергии на кромке эллипса $E_0 \times H_0$ будет связана с размером активной зоны следующим соотношением:

$$R = \frac{E_0 H_0 \tau}{L}; \quad (4)$$

$$E_0 = j_0 / \sigma; \quad (5)$$

$$H_0 = \frac{h}{2} \int_R^{\infty} \frac{j(y)}{y} dy = \frac{j_0 h}{2}. \quad (6)$$

Физическая модель обтекания электрическим током различных геометрических неоднородностей представлена на рисунке 1. В экспериментах применяли пластины разных размеров, которые соответствовали принятым геометрическим неоднородностям в виде эллиптического выреза, полукруглого выреза, углового выреза, прямоугольного выреза, тупого и острого вырезков.

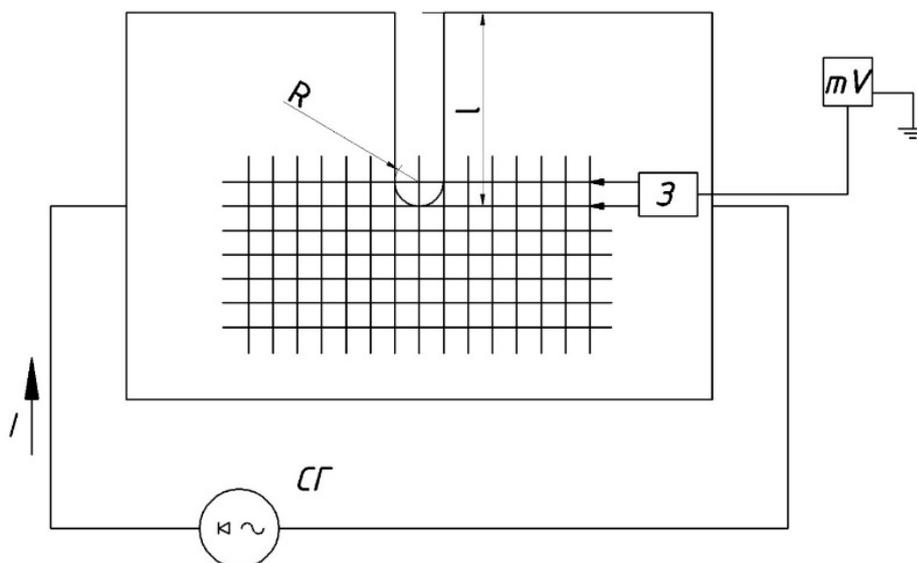


Рисунок 1 - Моделирование электрического поля тока

Электрическое поле в пластине возбуждали пропуская электрический ток ~ 60 А. В качестве источника электрического поля тока использовали сварочный трансформатор Ресанта САИ250. Соединения металлических

пластин с источником осуществляли с помощью болтовых соединений и мощных медных пластин по всей ширине образцов. В качестве нагрузки использовали никелевый нагреватель с сопротивлением 1 Ом.

Результаты моделирования представлены на рисунке 2. Стрелками обозначено направление тока постоянной плотности вдали от искажений.

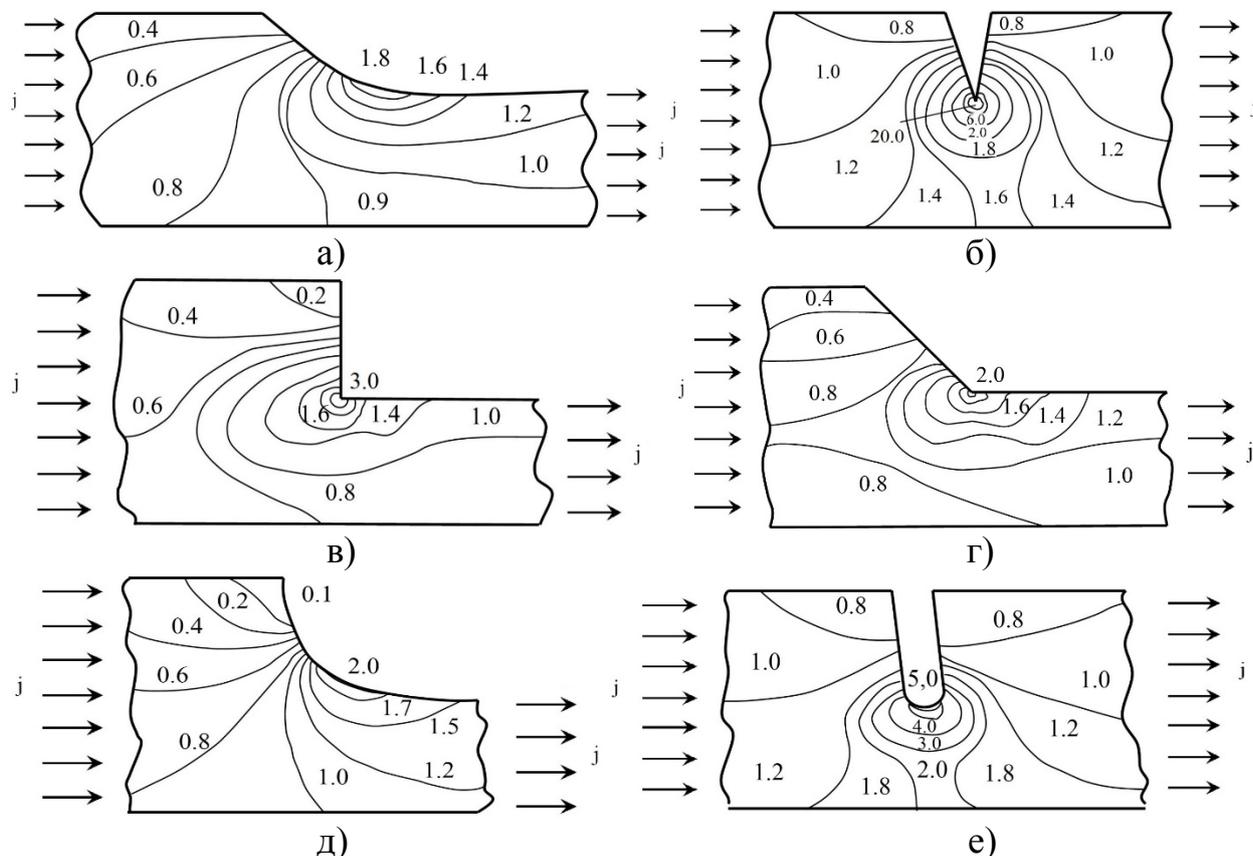


Рисунок 2 - Токовая интенсивность в плоском проводнике вокруг эллиптического выреза (а), острого выреза (б), прямоугольного выреза (в), углового выреза (г), полукруглого выреза (д), круглого выреза (е)

Из рисунков видно, что область повышенных значений токовой интенсивности находится в непосредственной близости к искаженной области проводника и занимает весьма малую зону прилегания к кривизне. Наибольшее усиление поля наблюдается в местах максимальной кривизны при ортогональной ориентации токовых линий в каждой ее точке. Изменяя геометрию кривизны поверхности проводника до полукруглого выреза или впадины и изменяя токовую интенсивность в искривленной зоне, получим небольшую степень усиления равномерного токового потока вокруг этой неоднородности. Результаты максимальных токовых интенсивностей сведены в таблицу 1.

Таблица 1 - Максимальные токовые интенсивности в геометрических неоднородностях проводника.

| геометрическая неоднородность \ режим работы сети | отсутствует | эллиптический вырез | полукруглый вырез | угловой вырез | прямоугольный вырез | тупой вырез | острый вырез |
|---|-------------|---------------------|-------------------|---------------|---------------------|-------------|--------------|
| Максимальная токовая интенсивность | 1 | 1,8 | 2,0 | 2,0 | 3,0 | 6,0 | 20 |

При протекании тока сквозь пластину происходил нагрев. Равномерность температурного поля на поверхности пластины регистрировали с помощью тепловизора (рисунок 3).

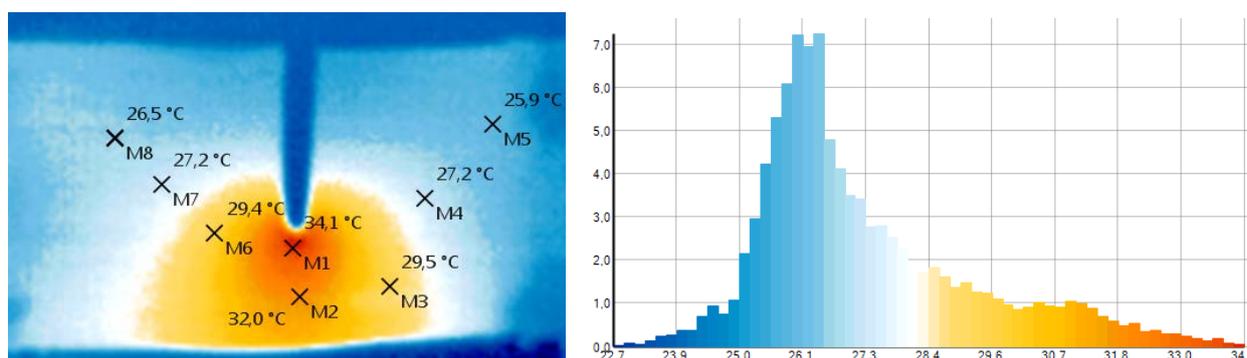


Рисунок 3 - Тепловизионный снимок и температурная диаграмма пластины с круглым вырезом

Нагрев пластины происходит неравномерно, очаг наблюдается в вершине выреза пластины, таким образом подтверждая то, что токовая интенсивность в этом месте сильно выше, чем в других точках. Градиент температурного поля составляет около 10 °С.

Аналогичный эксперимент производили и с другими пластинами, а именно: с пластинами с острым, эллиптическим, полукруглым, угловым и прямоугольным вырезами. Анализируя полученные тепловизионные снимки разных пластин можно сделать вывод о том, что, нагрев возле геометрической неоднородности возрастает с увеличением остроты данной неоднородности.

В электрических трансформаторных подстанциях большинство токопроводящих магистралей и соединений выполнено преимущественно шинопроводами. В своем большинстве шинопроводы, ввиду сложных электрических коммуникаций, подвергаются различного рода геометрическим изгибам, в своем 90° изгибы (таблица 2)

Таблица 2 - Процентное соотношение геометрических изгибов шинопроводов

| Угол изгиба, ° | 60 | 90 | 120 | Полукруглый изгиб |
|---------------------------|----|----|-----|-------------------|
| Процентное соотношение, % | 9 | 72 | 14 | 5 |

Для изучения влияния изгиба шинпровода на его нагрев было произведено тепловизионное исследование моделей изгибов шинпровода.

Тепловизионная съемка показывает, что шинпровод нагревается неравномерно. Очаг теплового излучения сконцентрирован именно на внутренней стороне изгиба, что отчетливо можно наблюдать на рисунке 4.

Компьютерное моделирование в программе ANSYS в полной мере подтверждает экспериментальные исследования, произведенные на физических моделях и говорит о том, что плотность тока возрастает непосредственно в основании геометрических неоднородностей.

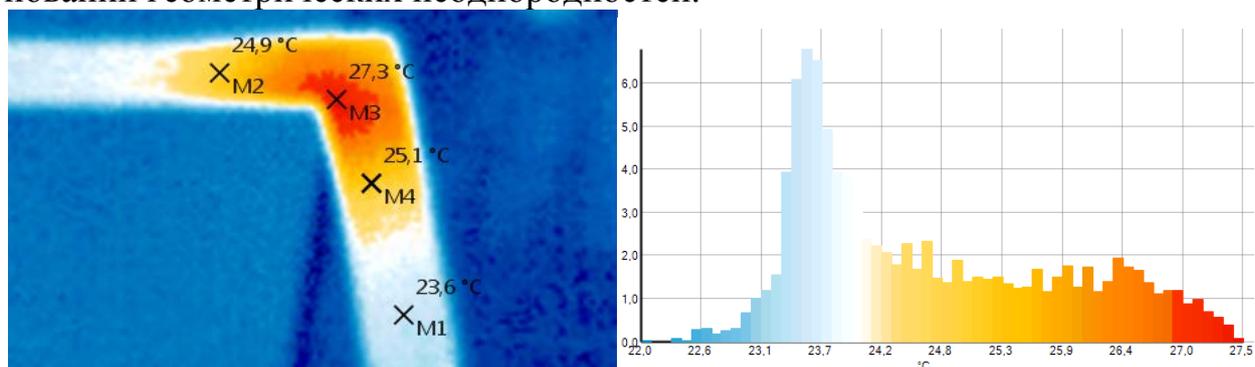


Рисунок 4 - Тепловизионный снимок и температурная диаграмма модели изогнутого шинпровода

Аналогичная явление было замечено и в реальных условиях в действующей трансформаторной подстанции (рисунок 5)

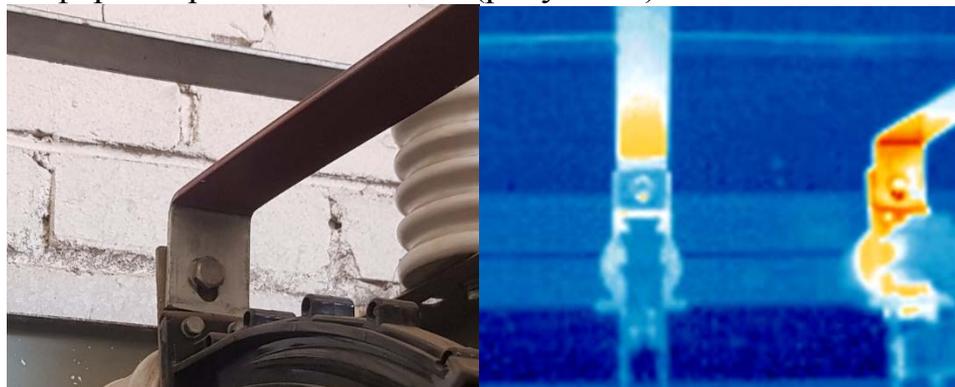


Рисунок 5 - Нагрев шинпроводов трансформаторной подстанции в местах изгиба

В качестве примера рассмотрена шина изогнутая под углом в 120° (рисунок 6). Плотность тока при установившемся режиме сильно возрастает на внутренней части изгиба, в то время как на внешней части сильно меньше. Таким образом максимальная плотность тока составляет $27,3 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$, при этом на внешней части изгиба плотность тока падает до $17,4 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$.

Также подобный эксперимент проводился с аналогичными шинами, но под иными изгибами, а именно: 90° , 60° и полукруглый изгиб. Результаты токовой интенсивности представлены в таблице 3.

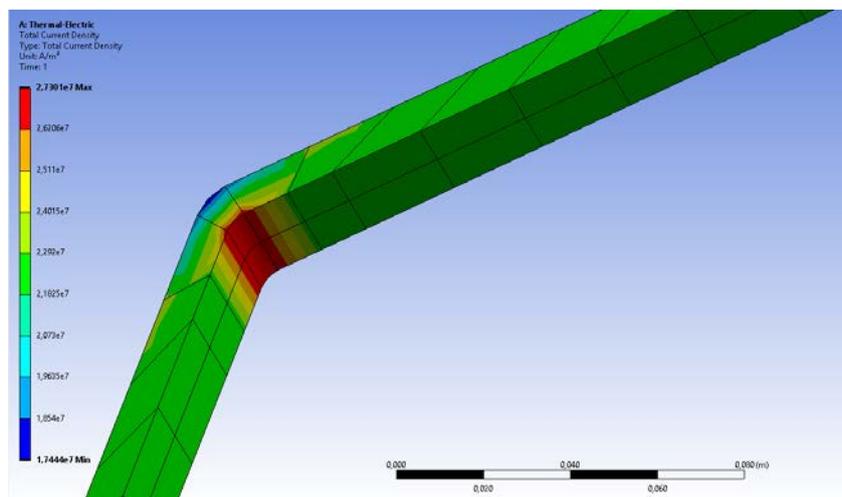


Рисунок 6 - Плотность тока в шинопроводе изогнутым под 120°

Таблица 3 - Токовая интенсивность в изгибах шинопроводов

| Изгиб шинопровода | Прямая шина | Полукруглый изгиб | угол изгиба 120 ° | угол изгиба 90 ° | угол изгиба 60 ° |
|-----------------------|-------------|-------------------|-------------------|------------------|------------------|
| Токовая интенсивность | 1 | 1,02 | 1,19 | 1,64 | 1,8 |

В третьей главе рассмотрены вопросы критериев надежности проводников по механическим, термомеханическим, тепловым и электродинамическим. Разница в плотности энергии в объеме проводника и в неоднородной зоне настолько значительна, что вызываемые силовые и температурные градиенты, что могут привести материал к локальному деформированию и разрушению.

При рассмотрении электромагнитной ситуации в пластине с протекающим сквозь нее электрическим током вдоль берегов острого выреза регистрируется повышенная токовая интенсивность в вершине выреза. (рисунок 7).

Сила, расщепляющая берега, по закону Ампера равна

$$F_y = i \mu_0 H l_T : \quad (7)$$

$$H = \frac{I}{2\pi\Delta}, \quad (8)$$

где i - ток (А); μ_0 - магнитная постоянная, равная $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; H - напряженность магнитного поля (А/м); l_T - длина выреза (м); Δ - расстояние между берегами выреза (м).

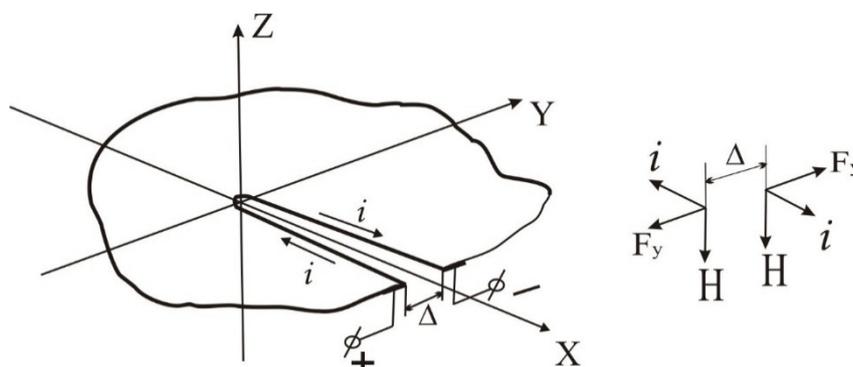


Рисунок 7 - Электромагнитная ситуация в пластине с острым вырезом

Полагая, что протяженность пластической зоны соизмерима с радиусом при вершине a получим

$$a = \frac{\kappa_{1C}^2}{\sigma_T^2}; \quad (9)$$

$$j_{кр} = \frac{\Delta}{hb} \sqrt{\frac{\pi\sigma_T}{\mu_o}} = \frac{1,77\Delta}{hb} \sqrt{\frac{\sigma_T}{\mu_o}}. \quad (10)$$

Следовательно, начало разрушения возможно при $K_1 = K_{1C}$, где $K_{1C} = \sigma_y \sqrt{\pi\ell_T}$, $\sigma_y = \sigma_T$ - механические напряжения от пондеромоторных сил.

Электромагнитная ситуацию в полубесконечной пластине толщиной h с краевым вырезом длиной l_m и радиусом в его вершине a (рисунок 8)

$$v = \frac{E_{x0} \cdot H_{z0}}{L}, \quad (11)$$

где, $E_{y0} = j_y \rho \sqrt{\ell_T/a}$ и $H_{z0} = j_y \ell_T$, где ρ - удельное сопротивление металла, получим критическое значение плотности тока j_y , при котором наступает тепловое разрушение области в вершине выреза

$$j_y^{кр} = \sqrt{\frac{\chi L}{a \ell_T \rho \sqrt{\ell_T/a}}}, \quad (12)$$

где, χ - коэффициент температуропроводности, связывающей скорость проникновения тепла на расстояние, соизмеримое с радиусом закругления при вершине a .

При больших длительностях ток успевает нагревать локальную область до характерных температур, что приводит к тому, что прогретый локальный объем металла теряет устойчивость и происходит образование сквозного отверстия (рисунок 9).

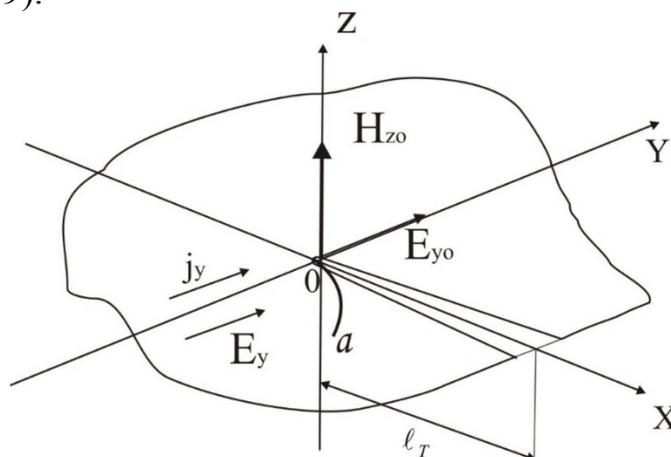


Рисунок 8 - Электромагнитная ситуация в вершине выреза.

E_y – напряженность электрического поля тока плотностью j_y вдали от выреза;
 E_{y0} , H_{z0} – напряженности электрического и магнитного полей в вершине выреза.

Для реальных медных образцов, применяемых в эксперименте, $j_y^{кр} = 4 \cdot 10^8 \text{ А/м}^2$ ($I_{кр} = 4 \cdot 10^4 \text{ А}$). При этом скорость продвижения фронта плавления равна $0,1 \text{ м/с}$.

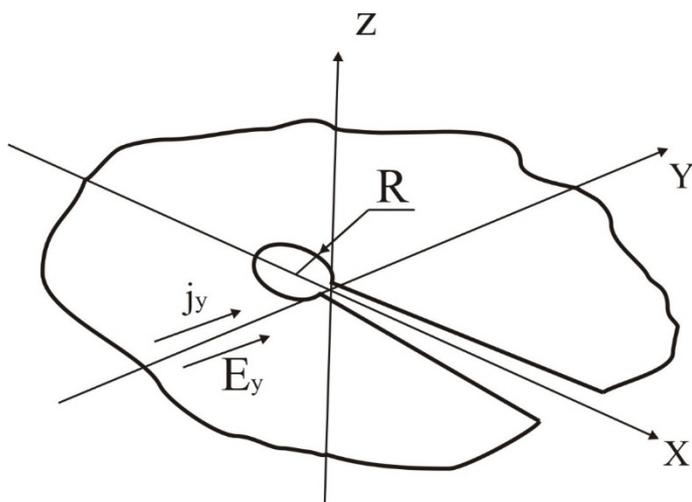


Рисунок 9 - Образование сквозного отверстия в вершине выреза

При отключении тока процесс разрушения прекращается с образованием «засверленного» тока отверстия радиуса R .

Например, для медного круглого провода радиусом $R = 10^{-3} \text{ м}$ и $T_{пл} = 1083 \text{ }^\circ\text{С}$; $\rho = 8930 \text{ кг/м}^3$; $\sigma = 0.59 \cdot 10^8 \text{ См/м}$; $C = 24,5 \text{ Дж/моль} \cdot \text{ }^\circ\text{С}$; $\chi = 7 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$; $I_{кр} = 10^3 \text{ А} = 1 \text{ кА}$.

В действительности, величина критического тока меньше из-за уменьшения проводимости, наличия поверхностных неоднородностей, непостоянства теплофизических констант в процессе разрушения и других внешних воздействий.

В то же время преобладание электродинамических усилий в разрушении над его тепловым характером физически означает, что электромагнитная энергия в виде $[E \cdot H]$, где H – напряженность магнитного поля, А/м , быстро внедряется в проводник, что последний из-за своей инертности не успевает превратиться в жидкость. Поэтому, минуя этот фазовый переход, он стремится к следующему – газообразному. Этому соответствует энергия сублимации или теплота испарения S (Дж/кг).

При этом условии $\sigma_\phi = \sigma_T$, напряженность магнитного поля для алюминиевых шин ($\sigma_T = 250 \text{ Мпа}$) составит $1,6 \cdot 10^8 \text{ А/м}$. Если считать проводник круглого сечения с радиусом 10 мм , что примерно соответствует реальной шине, плотность тока при этом должна быть равна 10^7 А/м^2 , а амплитуда тока соответственно 10^3 А при его длительности 10^{-6} с .

В четвертой главе рассмотрена механическая аналогия электромагнитного разрушения в критериях надежности проводников и представлены практические рекомендации на предмет изгибов электрических шинопроводов при монтаже.

По результатам измерения токовой интенсивности в опытах по электромагнитному моделированию и критериям электромагнитного разрушения по предложенным механизмам приведем некоторые расчеты для системы шин в

электрических сетях, работающих в различных режимах. В медных шинах вышеназванного сечения критическая плотность тока для электродинамического механизма равна $1,4 \cdot 10^7$ А/м², а для теплового механизма – 10^8 А/м². В шинопроводах из алюминия плотности токов в соответствующих условиях разрушения отличаются в два раза в меньшую сторону.

Рассмотрены такие режимы как номинальный режим, рабочий режим, симметричное короткое замыкание, несимметричное короткое замыкание и ток молнии. Очевидно, что более жесткие режимы увеличивают вероятность разрушения проводников по механическому критерию.

Результаты расчетов токовой интенсивности на неоднородностях плоского проводника при различных режимах приведены в таблице 4, а значения критических плотностей тока при выбранных критериях электромагнитного разрушения проводников приведены в таблице 5. Расчеты показывают, что появление опасных электродинамических усилий для медных проводников начинаются со значений токов симметричных коротких замыканий на эллиптических неоднородностях и возрастают с увеличением токовой интенсивности. Очевидно, что более жесткие режимы увеличивают вероятность разрушения проводников по механическому критерию.

Таблица 4 - Токовая интенсивность на геометрических неоднородностях проводника при различных режимах

| режим работы сети / геометрическая неоднородность | Прямая шина | Полукруглый изгиб | угол изгиба 120° | угол изгиба 90° | угол изгиба 60° |
|--|------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|
| Токовая интенсивность, о.е. | 1 | 1,02 | 1,2 | 1,64 | 1,8 |
| Номинальный режим, 10^6 А/м ² | 10^6 | $1,02 \cdot 10^6$ | $1,2 \cdot 10^6$ | $1,64 \cdot 10^6$ | $1,8 \cdot 10^6$ |
| Рабочий режим, $1,5 \cdot 10^6$ А/м ² | $1,5 \cdot 10^6$ | $1,53 \cdot 10^6$ | $1,8 \cdot 10^6$ | $2,46 \cdot 10^6$ | $2,7 \cdot 10^6$ |
| Симметричное к.з., 10^7 А/м ² | 10^7 | $1,02 \cdot 10^7$ | $1,2 \cdot 10^7$ | $1,64 \cdot 10^7$ | $1,8 \cdot 10^7$ |
| Несимметричное к.з., $2 \cdot 10^7$ А/м ² | $2 \cdot 10^7$ | $2,04 \cdot 10^7$ | $2,4 \cdot 10^7$ | $3,28 \cdot 10^7$ | $3,6 \cdot 10^7$ |
| Ток молнии, $5 \cdot 10^7$ А/м ² | $5 \cdot 10^7$ | $5,1 \cdot 10^7$ | $6 \cdot 10^7$ | $8,2 \cdot 10^7$ | $9 \cdot 10^7$ |

Таблица 5 - Критические плотности тока электромагнитного разрушения проводников, А/м²

| Материал проводника / Критерий | Механический | Тепловой |
|--------------------------------|------------------|------------------|
| Медь | $1,4 \cdot 10^7$ | 10^8 |
| Алюминий | $0,7 \cdot 10^7$ | $0,5 \cdot 10^8$ |

Таким образом в алюминиевых проводниках процесс опасного деформирования начинается уже при рабочем режиме, если угол изгиба шинопровода менее чем 60°. Кроме того, алюминиевые проводники находятся в худ-

ших условиях по пластичности, чем медные, поэтому вероятность начала разрушения по электродинамическому механизму у них большая чем у медных. У медных же начало опасного деформирования начинается у шин с углом изгиба 90° при симметричном коротком замыкании.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Экспериментальными методами и программными методами электромагнитного моделирования изучена токовая интенсивность на плоском проводнике с различными геометрическими неоднородностями. Физическим и математическим моделированием показано, что концентрация электрического и магнитного полей на геометрически меняющихся неоднородностях может привести к началу локального разрушения проводника.

2. Выявлены критерии надежности шинопроводов по предлагаемым механизмам электромагнитного разрушения проводников и аналитически установлены пороговые значения параметров тока, приводящие к потере устойчивости проводников при различных режимах работы электрических сетей и подтвержденные экспериментально.

3. Показана аналогия механического и электромагнитного разрушения проводников, которая связывает критический коэффициент интенсивности механических напряжений и степень токовой интенсивности в шинопроводах, обусловленной геометрическими неоднородностями.

4. Составлены таблицы практической рекомендации по предложенным критериям надежности шинопроводов, которые ограничивают плотности тока при различных режимах работы электрических сетей и предотвращают локальные разрушения в областях с геометрическими и технологическими неоднородностями в шинопроводах.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в периодических научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Квазиустойчивое состояние плоских проводников в условиях различной токовой интенсивности / А. Н. Кагдин, В. М. Иванов, А. В. Кобелев, М. Х. Ясари Али // Приложение к журналу. Вестник Тамбовского университета. – Тамбов : Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина, 2018. – С. 112-115. – DOI 10.20310/1810-0198-2018-23-122p-112-115.

2. Кагдин, А. Н. Моделирование распределительных электрических сетей 10/0,4 кВ / А. Н. Кагдин, М. Ю. Авдеева, Д. А. Джапарова // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2014. – № S2(52). – С. 59-64.

3. Калинин, В. Ф. Влияние характера нагрузки на качество электрической энергии / В. Ф. Калинин, С. В. Кочергин, А. Н. Кагдин // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2014. – № S2(52). – С. 71-74.

4. Кобелев, А. В. Вопросы анализа и моделирования развития электроэнергетических систем / А. В. Кобелев, С. В. Кочергин, А. Н. Кагдин // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2014. – № S2(52). – С. 83-86.

5. Критерии надежности электромагнитного разрушения шинопроводов / В. М. Иванов, А. В. Лановая, А. В. Кобелев, А. Н. Кагдин // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2017. – Т. 23. – № 1. – С. 72-76. – DOI 10.17277/vestnik.2017.01.pp.072-076.

Публикации в изданиях, рецензируемых наукометрической базой Scopus:

6. Nanomodified polymer composites: Electrical conductivity and practical application / V. Yagubov, A. Shegolkov, A. Tkachev [et al.] // AIP Conference Proceedings, Tomsk, 19–23 ноября 2018 года. – Tomsk: American Institute of Physics Inc., 2019. – P. 020012. – DOI 10.1063/1.5099604.

Публикации в других изданиях:

7. Иванов, В. М. Надежность круглых шинопроводов в силовых электрических сетях / В. М. Иванов, А. В. Кобелев, А. Н. Кагдин // Цифровая трансформация в энергетике : Материалы Всероссийской научной конференции, Тамбов, 17–18 декабря 2019 года. – Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, 2020. – С. 88-92.

8. Повышение надежности шинопроводов искусственным уменьшением в них степени токовой интенсивности / В. М. Иванов, А. Н. Кагдин, А. С. Ступников, Я. А. М. Хашиш // Энергетика. Проблемы и перспективы развития : материалы IV Всероссийской молодежной научной конференции. Научное электронное издание, Тамбов, 19–20 декабря 2018 года. – Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, 2019. – С. 103-104.

9. Связь критериев прочности проводников с механизмами электромагнитного разрушения / В. М. Иванов, А. В. Кобелев, А. Н. Кагдин, М. Н. Решетов // Энергетика. Проблемы и перспективы развития : материалы IV Всероссийской молодежной научной конференции. Научное электронное издание, Тамбов, 19–20 декабря 2018 года. – Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, 2019. – С. 104-105.

10. Формирование наноструктуры проводника и волновой характер ее изменения в дефектных зонах / А. Н. Кагдин, Е. А. Иванов, Р. В. Тавлаханов, Р. М. Р. Рахи // Энергетика. Проблемы и перспективы развития : материалы IV Всероссийской молодежной научной конференции. Научное электронное издание, Тамбов, 19–20 декабря 2018 года. – Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, 2019. – С. 107-108.

11. Упрочняющее действие тока в зонах технологических отверстий / А. Н. Кагдин, Е. А. Иванов, Р. В. Тавлаханов, Я. А. М. Хашиш // Энергетика. Проблемы и перспективы развития : материалы IV Всероссийской молодежной научной конференции. Научное электронное издание, Тамбов, 19–20 декабря 2018 года. – Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, 2019. – С. 109-110.

12. Моделирование токовой интенсивности в шинпроводах низкого напряжения / А. В. Кобелев, А. Н. Кагдин, М. Н. Решетов, А. С. Ступников // Энергетика. Проблемы и перспективы развития : материалы IV Всероссийской молодежной научной конференции. Научное электронное издание, Тамбов, 19–20 декабря 2018 года. – Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, 2019. – С. 112-113.

13. Влияние степени токовой интенсивности на разрушение проводников / А. В. Кобелев, А. Н. Кагдин, А. С. Ступников, М. Н. Решетов // Энергетика. Проблемы и перспективы развития : материалы IV Всероссийской молодежной научной конференции. Научное электронное издание, Тамбов, 19–20 декабря 2018 года. – Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, 2019. – С. 113-114.

14. Кобелев, А. В. Влияние термических напряжений на пондемоторные критерии надежности / А. В. Кобелев, А. Н. Кагдин // Энергосбережение и эффективность в технических системах : Материалы VI Международной научно-технической конференции студентов, молодых учёных и специалистов, Тамбов, 03–05 июня 2019 года. – Тамбов: Издательство Першина Р.В., 2019. – С. 245-246.

15. Иванов, В. М. Пондемоторные критерии надежности проводника / В. М. Иванов, А. Н. Кагдин // Энергосбережение и эффективность в технических системах : Материалы VI Международной научно-технической конференции студентов, молодых учёных и специалистов, Тамбов, 03–05 июня 2019 года. – Тамбов: Издательство Першина Р.В., 2019. – С. 246-247.

16. Иванов, В. М. Токовая интенсивность вокруг тупого выреза в плоском проводнике / В. М. Иванов, А. Н. Кагдин // Энергосбережение и эффективность в технических системах : Материалы VI Международной научно-технической конференции студентов, молодых учёных и специалистов, Тамбов, 03–05 июня 2019 года. – Тамбов: Издательство Першина Р.В., 2019. – С. 247-249.

17. Надёжность геометрически неоднородных шинпроводов / А. Н. Кагдин, А. В. Носуров, А. Р. Корсун, В. И. Сафронов // Энергосбережение и эффективность в технических системах: Материалы IV Международной научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов, Тамбов, 10–12 июля 2017 года / Тамбовский государственный технический университет. – Тамбов: Издательство Першина Р.В., 2017. – С. 289-291.

18. Токовая интенсивность в шинпроводах с геометрическими неоднородностями / А. В. Кобелев, А. Н. Кагдин, В. И. Сафронов, А. Р. Корсун // Энергосбережение и эффективность в технических системах : Материалы IV Международной научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов, Тамбов, 10–12 июля 2017 года / Тамбовский государственный технический университет. – Тамбов: Издательство Першина Р.В., 2017. – С. 296-297.

Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве, заключается в следующем: в [1] изучена токовая интенсивность на различных геометрических неоднородностях плоских проводников; в [2] смоделирована работа электрических сетей, работающих в несимметричном режиме, в [3] оценено влияние ухудшения качества электрической энергии на энергоэффективность и надежность городских сетей электроснабжения, в [4] освещены проблемы надежности и методы моделирования аварийных и послеаварийных режимов работы электроэнергетических систем, в [5] сформированы критерии надежности электромагнитного разрушения шинопроводов, в [6] рассмотрены вопросы электропроводности материалов, в [7,8,9] изучены вопросы надежности круглых шинопроводов в силовых электрических сетях, предложены методы повышения надежности шинопроводов путем уменьшения в них степени токовой интенсивности, в [10,11,16,17] изучены дефекты проводников, в [10,11] смоделированы токовые интенсивности в шинопроводах, а также выявлены их негативные влияния на их целостность, в [14,15,18] рассмотрены вопросы пондеромоторных воздействий на шинопроводы.