

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 621.316.37.064.1

**ПОТАЧИЦ**  
**Ярослав Владимирович**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА  
ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ КОНСТРУКЦИЙ  
ТОКОВЕДУЩИХ СИСТЕМ С ГИБКИМИ ПРОВОДНИКАМИ**

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05.14.02 – Электрические станции  
и электроэнергетические системы

Минск 2023

Работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете

Научный  
руководитель – **Пономаренко Евгений Геннадьевич**, кандидат технических наук, доцент, декан энергетического факультета, доцент кафедры «Электрические станции» Белорусского национального технического университета, г. Минск

Официальные  
оппоненты: **Короткевич Михаил Андреевич**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электрические системы» Белорусского национального технического университета, г. Минск;

**Протосовицкий Иван Васильевич**, кандидат технических наук, доцент, декан агроэнергетического факультета УО «Белорусский государственный аграрный технический университет», г. Минск

Оппонирующая  
организация УО «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», г. Гомель

Защита состоится «17» марта 2023 года в 14<sup>00</sup> часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.02 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, пр. Независимости, 65, корп. 2, ауд. 201, тел. ученого секретаря (+37517) 293-91-45, адрес электронной почты: tes@bntu.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.  
Автореферат разослан «15» февраля 2023 г.

И. о. ученого секретаря совета  
по защите диссертаций  
доктор технических наук, профессор

Г. Т. Кулаков

© Потачиц Я. В., 2023

© Белорусский национальный  
технический университет, 2023

## ВВЕДЕНИЕ

Увеличение электропотребления и соответственно генерации приводит в аварийных случаях к росту токов короткого замыкания (КЗ). При достижении определенной величины тока КЗ гибкие провода электроустановок не способны противостоять электродинамическому действию тока без повреждений, препятствующих их дальнейшей нормальной работе, в результате чего происходит нарушение их электродинамической стойкости. Движение токоведущих частей при КЗ вызывает значительные динамические усилия на конструктивные элементы распределительных устройств (РУ), которые могут оказаться выше допустимых по условию механической прочности. Поэтому в процессе проектирования необходимо учитывать электродинамическое действие токов КЗ на проводники и конструктивные элементы электроустановок. Стоит отметить, что в связи с вводом в эксплуатацию Белорусской атомной электростанции произошел рост расчетных токов КЗ в энергосистеме, особенно вблизи АЭС. По этой причине необходимо рассмотреть возможность использования новых конструктивных элементов, повышающих электродинамическую стойкость конструкций токоведущих систем с гибкими проводниками.

Одним из способов повышения электродинамической стойкости распределительных устройств и линий электропередачи с расщепленными фазами (РФ) является установка внутрифазных дистанционных распорок. Их можно применять как на вновь сооружаемых, так и существующих объектах. Перед проектировщиком тогда возникает задача определения необходимого количества, типа и оптимальной схемы установки распорок.

Оценка электродинамической стойкости РФ имеет свои особенности, связанные с влиянием шага расщепления, наличием нескольких характерных максимумов тяжения. Для решения поставленных задач на кафедре «Электрические станции» БНТУ вот уже более 40 лет разрабатываются эффективные методы расчета с использованием векторно-параметрических уравнений гибкой упругой нити и численных методов их решения.

Эффективным инструментом для ограничения тяжений при КЗ может являться демпфер тяжения, особенно при установке в пролетах с гибкими проводниками небольшой длины, характерных для открытых распределительных устройств (ОРУ). В данном случае задача проектировщика заключается в выборе типа и размера демпфера, а также оценке его эффективности.

Для расщепленных фаз распределительных устройств электроустановок актуальной проблемой является их закручивание относительно своей оси при налипании одностороннего гололеда, ураганах, субколебаниях

или КЗ. В результате этого наблюдается нарушение крутильной стабильности фазы: соударение проводов в середине подпролета и трение проводов витого проводника друг о друга, что приводит к повреждению проводников и, как следствие, к нарушению электроснабжения потребителей. При выборе схемы расстановки распорок в пролете необходимо исследовать крутильную стабильность фазы – ее способность восстанавливать исходную геометрию после устранения внешних воздействий на провода и распорки фазы во время пляски или при КЗ.

В настоящее время видится актуальной проблема определения динамических нагрузок, которые передаются при КЗ от проводников на конструктивные элементы электроустановок. Расчет на механическую прочность при проектировании таких аппаратов, как силовые выключатели, опорные изоляторы, измерительные трансформаторы тока и напряжения, производится лишь с учетом их статического нагружения, например по заданному минимальному разрушающему статическому усилию на изгиб. Статические силы возникают от тяжения провода (спуска) и веса деталей аппарата. При КЗ на конструктивные элементы действуют кратковременные динамические силы, под действием которых аппараты испытывают вынужденные изгибающие колебания. Однако возможное наступление резонанса при совпадении составляющих гармоник динамической силы с одной из собственных частот колебаний аппарата остается неучтенным, что в свою очередь может повлечь разрушение аппарата при воздействии даже очень небольшой силы.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что проблема электродинамической стойкости электроустановок с гибкими проводниками актуальна для Республики Беларусь и проектным организациям нужны новые, более совершенные методы расчета электродинамической стойкости гибких проводов и аппаратов с применением новых конструктивных элементов.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Связь работы с крупными научными программами и темами**

Работа выполнялась в соответствии с заданием 1.2.06 «Совершенствование методов расчета электродинамической стойкости и аэродинамической стабильности современных токоведущих конструкций с гибкими проводниками электроустановок» подпрограммы «Энергетическая безопасность и надежность энергетических систем» Государственной программы научных исследований «Энергетические системы, процессы и технологии» (2016–2020 годы), утвержденной постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 10.06.2015 № 483 «Об утверждении

перечня государственных программ научных исследований на 2016–2020 годы»; заданием 1.2.20 «Совершенствование методов расчета электродинамической стойкости электроустановок с гибкими проводниками с учетом влияния конструктивных элементов» подпрограммы «Энергетическая безопасность и надежность энергетических систем» Государственной программы научных исследований «Энергетические системы, процессы и технологии» на 2016–2020 годы, утвержденной постановлением Президиума НАН Беларуси от 27.12.2018 № 72, а также заданием 1.2.01 «Расчет гибких проводников электроустановок в условиях воздействия статических и электродинамических нагрузок» подпрограммы «Энергетическая безопасность Республики Беларусь на основе принципов устойчивого развития» Государственной программы научных исследований «Энергетические и ядерные процессы и технологии» (2021–2025 годы), утвержденной постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 27.07.2020 № 438 «Об утверждении перечня государственных программ научных исследований на 2021–2025 годы» (Приложение А и Б).

#### **Цель и задачи исследования**

Целью исследования является совершенствование существующих методов расчета электродинамической стойкости гибких токоведущих конструкций электроустановок с учетом новых конструктивных элементов и разработка рекомендаций по повышению их стойкости к токам короткого замыкания и субколебаниям.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- модифицировать упрощенный метод расчета сил сжатия дистанционных внутрифазных распорок при коротком замыкании с учетом их упругих и инерционных характеристик;
- выбрать оптимальные длины подпролетов и типы дистанционных распорок для повышения электродинамической стойкости расщепленной фазы;
- усовершенствовать метод расчета крутильных колебаний расщепленной фазы с учетом инерционных характеристик проводов и распорок;
- разработать метод расчета электродинамической стойкости гибких шин распределительных устройств с учетом демпферов тяжения на основе векторно-параметрического метода и получить значения оптимальных параметров демпфера, при которых будет достигнута его максимальная эффективность;
- подтвердить достоверность разработанных методов сопоставлением расчетных и опытных данных;
- разработать алгоритм и компьютерные программы для расчета электродинамической стойкости гибкой ошиновки открытых распределитель-

ных устройств с одиночными и расщепленными проводами, учитывающие новые конструктивные элементы;

- подтвердить возможность наступления резонанса при совпадении частот вынужденных и собственных колебаний основных конструктивных элементов типовых открытых распределительных устройств;

- разработать методику определения динамических нагрузок на основные конструктивные элементы типовых открытых распределительных устройств при резонансе.

Объектом исследования являются токоведущие конструкции электроустановок с гибкими проводниками.

Предмет исследования – параметры и характеристики конструктивных элементов электроустановок с гибкими проводниками, влияющие на их электродинамическую стойкость.

Решение названных задач выполнялось методами теоретического анализа, вычислительного эксперимента, компьютерного и математического моделирования.

**Научная новизна** работы заключается в:

- модифицированном методе расчета сил сжатия внутрифазных распорок при КЗ, отличающемся учетом их упругих и инерционных характеристик, позволяющем определять значения механических усилий, возникающих в расщепленной фазе;

- усовершенствованном методе расчета крутильных колебаний расщепленной фазы, позволяющем выявлять случаи устойчивого нарушения крутильной стабильности фазы и отличающемся учетом инерционных характеристик проводов и распорок в схемах их неравномерной установки в пролете;

- методе расчета параметров электродинамической стойкости гибкой ошиновки ОРУ с одиночными и расщепленными проводами, отличающемся учетом влияния демпферов тяжения на динамику проводников;

- методике определения динамических нагрузок на основные конструктивные элементы ОРУ, отличающейся учетом резонанса, позволяющей разрабатывать рекомендации, направленные на повышение механической прочности электрических аппаратов.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Модифицированный упрощенный метод расчета сил сжатия дистанционных внутрифазных распорок при коротком замыкании, отличающийся учетом их упругих и инерционных характеристик.

2. Рекомендации по выбору оптимальных схемно-компоновочных решений в части выбора длин подпролетов и типов дистанционных распорок, при которых достигается наибольший эффект в уменьшении механических усилий, действующих на распорку при коротком замыкании и ограничении размаха колебаний проводов расщепленной фазы при субколебаниях.

3. Усовершенствованный метод расчета крутильных колебаний расщепленной фазы, отличающийся учетом инерционных характеристик проводов и распорок в схемах их неравномерной установки в пролете. Метод оценки крутильной устойчивости фазы по предельному углу закручивания распорки.

4. Расчет электродинамической стойкости гибкой ошиновки типовых открытых распределительных устройств 110–330 кВ с одиночными и расщепленными проводами на основе векторно-параметрического метода, отличающегося учетом влияния демпферов тяжения на динамику проводов в различных стадиях их движения при коротком замыкании и после его отключения.

5. Рекомендации по выбору оптимальных параметров демпфера, при которых будет достигнута его максимальная эффективность в ограничении пиков тяжений проводников при коротком замыкании.

6. Метод расчета электродинамической стойкости основных конструктивных элементов типовых открытых распределительных устройств при коротком замыкании, отличающийся учетом возможности совпадения частот собственных и вынужденных колебаний конструктивных элементов.

7. Методика определения динамических нагрузок на основные конструктивные элементы типовых открытых распределительных устройств при наступлении резонанса.

#### **Личный вклад соискателя ученой степени**

Диссертационное исследование является результатом научно-исследовательских работ по электродинамической стойкости токоведущих конструкций электроустановок с гибкими проводами, выполненных на кафедре «Электрические станции» БНТУ при участии автора. Автором выполнена модификация упрощенного метода расчета сил сжатия дистанционных внутрифазных распорок с учетом их упругих и инерционных характеристик. Автору принадлежат рекомендации по выбору оптимальных схемно-компоновочных решений в части выбора длин подпролетов и типов дистанционных распорок, при которых достигается наибольший эффект в уменьшении механических усилий, действующих на распорку при коротком замыкании и ограничении размаха колебаний проводов расщепленной фазы при субколебаниях. Им выполнена оценка крутильной устойчивости фазы по предельному углу закручивания распорки. Осуществлен расчет электродинамической стойкости гибкой ошиновки типовых открытых распределительных устройств 110–330 кВ с одиночными и расщепленными проводами на основе векторно-параметрического метода, который учитывает влияние демпферов тяжения на динамику проводов в различных стадиях их движения при коротком замыкании и после его отключения, и предложены рекомендации по выбору оптимальных параметров демпфера, при которых будет достигнута его максимальная эффектив-

ность. Разработана методика определения динамических нагрузок на основные конструктивные элементы типовых открытых распределительных устройств при наступлении резонанса.

Анализ и обобщение полученных результатов проводились совместно с научным руководителем к. т. н., доцентом Пономаренко Е. Г., а также д. т. н., профессором Сергеем И. И., которые оказывали практическую помощь и консультации на всех этапах выполнения диссертационной работы.

#### **Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов**

Результаты исследований докладывались на следующих международных научно-технических конференциях: Девятой и Одиннадцатой международных конференциях “New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementations” (Zakopane, Poland, 2015, 2019 гг.); Одиннадцатой, Двенадцатой, Тринадцатой, Четырнадцатой и Шестнадцатой международных научно-технических конференциях «Наука – образованию, производству, экономике» (Минск: БНТУ, 2013, 2014, 2015, 2016, 2018 гг.); Международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию БНТУ «Современные тенденции в развитии экономики энергетики» (Минск: БНТУ, 2021 г.).

Полученные при выполнении диссертационных исследований результаты используются в учебном процессе на кафедре «Электрические станции» БНТУ при выполнении курсовых и дипломных проектов (Приложение В), а также переданы предприятию ОАО «Белэлектромонтажладка», где могут применяться для повышения технического совершенства эксплуатирующихся и проектируемых распределительных устройств с гибкими проводниками (Приложение Г).

#### **Опубликование результатов диссертации**

По материалам диссертационной работы опубликованы 18 печатных работ, из них пять статей в журналах, включенных в перечень научных изданий ВАК Республики Беларусь, общим объемом 3,8 авторского листа, 13 текстов и тезисов докладов в сборниках материалов международных научно-технических конференций. Общее количество опубликованного материала составляет 4,3 авторского листа.

#### **Структура и объем диссертации**

Диссертация включает в себя перечень условных сокращений, введение, общую характеристику работы, основную часть, состоящую из четырех глав, заключение, список использованных источников и пять приложений. Список использованных источников включает 100 наименований и занимает 8 страниц. Общий объем диссертационной работы составляет 157 страниц. Текст диссертации содержит 26 таблиц и 72 рисунка общим объемом 28 страниц. Приложения занимают 4 страницы.



## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

**Первая глава** посвящена анализу и оценке существующих методов расчета электродинамической стойкости токоведущих конструкций с гибкими проводниками, а также рассмотрению современных устройств и конструктивных решений, позволяющих повысить надежность работы электроустановок с гибкой ошиновкой как с одиночными, так и с расщепленными фазами.

На сегодняшний день наиболее распространенными являются приближенные и численные методы расчета. Вместе с тем было отмечено, что приближенные методы имеют ряд допущений, которые могут привести к искажению результатов расчета. Численные методы, основанные на представлении провода гибкой упругой нитью, позволяют получать более точные результаты, однако подлежат дальнейшему совершенствованию в плане учета новых конструктивных элементов и инновационных технических решений.

Анализ научно-технических публикаций показал, что одним из эффективных способов повышения электродинамической стойкости распределительных устройств и линий электропередачи с расщепленными фазами является установка демпфирующих внутрифазных дистанционных распорок. Наличие в конструкции данной распорки демпферного узла с эластомерным вкладышем позволяет поглощать энергию движения проводов и тем самым повышает электродинамическую стойкость и крутильную стабильность расщепленной фазы. В этом случае возникает задача выбора необходимого количества распорок и определения оптимальной схемы их расстановки в пролете. Еще одним новым конструктивным элементом, предназначенным для повышения электродинамической стойкости и аэродинамической стабильности гибких шин ОРУ, является устройство контроля натяжения проводов (демпфер тяжения). Демпфер устанавливается между порталом и гирляндой изоляторов и снижает передачу нежелательных усилий на порталы при статических нагрузках. Была поставлена задача оценить эффективность данного устройства не только при статических, но и при динамических нагрузках, обусловленных токами КЗ.

**Во второй главе** усовершенствована математическая модель расчета динамических усилий в гибкой ошиновке с расщепленными проводниками, оборудованными жесткими и демпфирующими внутрифазными распорками, предложены схемы расстановки распорок, позволяющие уменьшать механические усилия в РФ при КЗ, проведена оценка влияния упруго-вязких характеристик распорок на колебания проводов на участках между распорками.

Для математического описания динамики расщепленных проводов при КЗ использовалось уравнение движения гибкой упругой нити, которое дополнялось уравнением поступательных перемещений центра масс распорки, уравнением закручивания распорок, после чего данная система решалась совместно. Такое представление пригодно для анализа электродинамической стойкости РФ при любом взаимном расположении фазных проводников. Однако расчет по данному методу трудоемок. Дело в том, что провода оказываются под действием распределенных ЭДУ и сосредоточенных нагрузок, обусловленных весом распорок. А по своей структуре уравнение движения гибкой нити не может быть использовано для расчета движения элементов проводов, включающих сосредоточенные нагрузки. По этой причине была разработана упрощенная модель внутрифазной распорки, в которой распорка представляется в виде пружинной конструкции (рисунок 1), обладающей жесткостью, соответствующей жесткости материала распорки. Основное упрощение состоит в том, что провод не разбивается на участки между распорками, а моделируется в виде единой гибкой упругой нити, что позволяет отказаться от расчета краевых условий во многих точках пролета и делает решение более устойчивым. Действия распорок на проводники расщепленной фазы заменяются усилиями, которые возникают в распорках при их упругих деформациях в циклах сжатия-растяжения при движении гибких проводников. Процесс сжатия или удлинения распорки при движении проводов описывается следующим уравнением:

$$M_p \frac{d^2 y}{dt^2} = \sum \bar{F}_i - C_y y, \quad (1)$$

где  $M_p$  – масса распорки, кг;

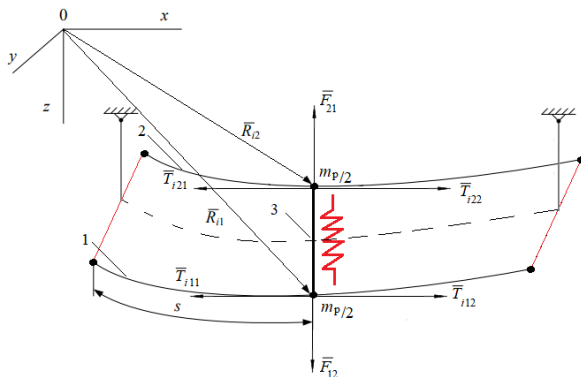
$C_y$  – упругая жесткость распорки (пружины), Н/м;

$\sum \bar{F}_i$  – сумма сил, приложенных к  $i$ -й распорке, Н;

$y$  – сжатие (удлинение) пружины, м.

Масса распорки при этом добавляется к массе проводника на участке крепления распорки в подпролете.

Достоинство упрощенного метода состоит в том, что обеспечивается большая устойчивость численного решения при меньшем объеме вычислений. Недостаток данного метода главным образом заключается в том, что при использовании распорок сложной конфигурации невозможно учесть все конструктивные характеристики.



**1, 2 – провода расщепленной фазы; 3 – распорка**  
**Рисунок 1. – Упрощенная модель расщепленной на два провода фазы**

Согласно предложенному упрощенному методу был проведен вычислительный эксперимент и произведен расчет первого максимума тяжения  $T_{1\max}$  и сил сжатия распорок  $F_{\text{смак}}$ . Расчет проводился для пролета типового ОРУ 110 кВ длиной 48 м с шагом расщепления 0,2 м. Достоверность расчетов подтверждается сопоставлением результатов по разработанной методике с опытными данными, полученными рабочей группой СИГРЭ (таблица 1).

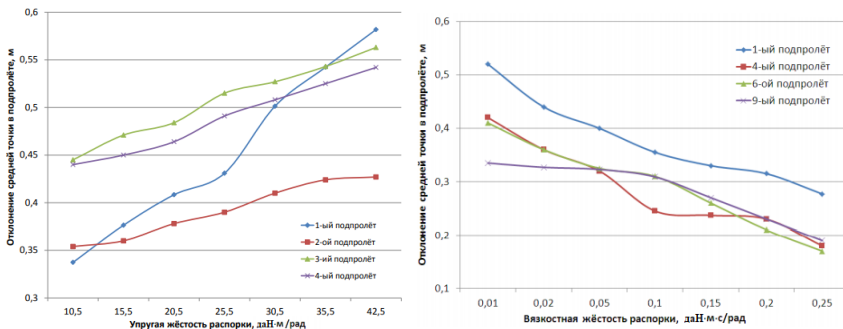
**Таблица 1. – Результаты вычислительного эксперимента**

$I_{\text{к}}$ , кА	Марка провода	$T_{1\max}$ , кН, ОПЫТ	$T_{1\max}$ , кН, МЕТОД	Погреш- ность, %, $\Delta T_{1\max}$	Сила сжатия распорок, кН		Погреш- ность, %, $\Delta F_{\text{смак}}$
					$F_{\text{смак}}$ , кН, ОПЫТ	$F_{\text{смак}}$ , кН, МЕТОД	
22,5	2×ASTER570	63,0	62,1	1,42	6,0	5,9	1,6
41	2×ASTER570	66,4	61,3	7,68	8,0	8,8	10,0
59,8	2×ASTER570	69,1	67,7	2,01	16,0	15,8	1,2
60,2	2×ASTER570	75,4	73,8	2,12	14,8	18,2	22,9
60,2	2×PETUNIA612	81,8	79,4	2,93	14,6	14,4	1,4
60,2	2×PETUNIA612	81,8	80,3	1,83	15,1	14,8	6,4
56,9	2×PETUNIA612	78,2	77,7	1,28	15,5	16,0	14,7

Кроме того, для оценки влияния упругих характеристик распорок на размах колебания проводов в подпролете были выполнены расчеты колебаний фазы с четырехлучевыми распорками (рисунок 2).

Как видно из рисунка 2а, при повышении упругой жесткости распорок амплитуды колебаний проводов фазы увеличиваются, при этом с повыше-

нием вязкостной жесткости распорок во всех подпролетах наблюдалось заметное снижение амплитуды колебаний проводов из-за возрастающих демпфирующих свойств (рисунок 2б).



**а – от упругой жесткости; б – от вязкостной жесткости**  
**Рисунок 2. – Зависимость размаха колебаний проводов фазы от упругой и вязкостной жесткости распорок**

В третьей главе определены параметры крутильной стабильности для токоведущих частей с расщепленными фазами. Выявлены случаи устойчивого нарушения крутильной стабильности расщепленных фаз. Разработаны численный метод и компьютерная программа расчета электродинамической стойкости гибкой ошиновки ОРУ с одиночными и расщепленными проводами, учитывающие влияние демпферов тяжения на динамику составляющих фазу проводов. Определены оптимальные значения упругой податливости демпфера, при которых достигается его максимальная эффективность в ограничении пиков тяжений при КЗ.

Для РФ воздушных линий актуальной проблемой является их закручивание при коротких замыканиях или неблагоприятных климатических условиях, таких как гололедные отложения или ветровые нагрузки. При закручивании фазы может быть нарушена ее крутильная стабильность, что в свою очередь приводит к соударению проводов между распорками, трению проволок витого проводника друг о друга и, в конечном счете, преждевременному износу и повреждению. По этой причине необходимо провести исследования свободных поступательно-крутильных колебаний фазы и выработать рекомендации по повышению ее крутильной стабильности.

Была принята модель, в которой провода с действующими на них распределенными моментами заменялись сосредоточенными моментами, прикладываемыми непосредственно к распоркам (рисунок 3), что позволяет не учитывать внешние распределенные моменты, действующие по длине провода, а это значительно упрощает решение задачи.

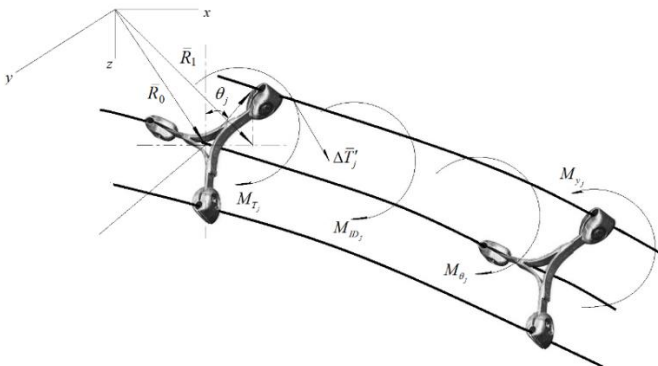


Рисунок 3. – К выводу крутильных колебаний распорки

В этом случае в соответствии с принципом связей механики распорку можно считать свободным телом, а ее вращение под действием приложенных моментов сил описать следующим выражением:

$$J_B \frac{d^2 \theta_j}{dt^2} = M_B, \quad (2)$$

где  $M_B = \sum_{j=1}^n M_{y_j}$  – сумма моментов сил, приложенных к лучам распорки;

$\theta_j$  – угол поворота луча распорки относительно рамы;

$J_B$  – момент инерции вращения луча распорки относительно рамы.

Очевидно, что основным параметром для анализа крутильной стабильности РФ будет являться некоторый предельный угол закручивания распорки  $\theta_p = \theta_{\text{пред}}$ , после достижения которого фаза будет не в состоянии вернуться в исходное положение. Определить этот угол можно из статического расчета по условию равновесия приложенных к распорке моментов сил:

$$\theta_p = \frac{\sum_{j=1}^n M_{y_j}}{nc}, \quad (3)$$

где  $n$  – кратность расщепления фазы;

$c$  – коэффициент упругости луча распорки.

При проведении вычислительного эксперимента для оценки крутильной стабильности расщепленной фазы были выбраны пролеты ЛЭП дли-

ной от 100 до 200 м, так как нарушение стабильности более вероятно именно в длинных пролетах. На первом этапе для фазы, состоящей из двух проводов, исследовалось влияние различных параметров пролета на крутильную стабильность. Так, например, судя по данным таблиц 2 и 3 (в которых закрашенные ячейки означают случаи нарушения крутильной стабильности), изменения длины пролета  $L$  и шага расщепления  $h$  мало влияют на возможность закручивания проводников в фазе и прослеживается очевидная тенденция, что чем больше распорок  $N$  в пролете, тем меньше вероятность закручивания фазы.

Таблица 2. – Влияние изменения длины пролета  $L$  на крутильную стабильность фазы в зависимости от числа распорок  $N$

$L, \text{ м}$ \ $N$	1	2	3	4	5	6	7
100							
150							
200							

Проанализировав полученные результаты, сделано предположение, что критическим параметром, с точки зрения нарушения крутильной стабильности, являются длины первого и последнего подпролетов. Руководствуясь таким предположением, для повышения крутильной стабильности можно предложить расставлять распорки неравномерно по длине пролета: гуще у опор и реже в центральной части.

В этом случае актуальной задачей является определение критической длины подпролета  $l_{\text{кр}}$ , при которой возможно закручивание проводников в расщепленной фазе.

Таблица 3. – Влияние изменения шага расщепления  $h$  на крутильную стабильность фазы в зависимости от числа распорок  $N$

$h, \text{ м}$ \ $N$	1	2	3	4	5	6	7
0,1							
0,2							
0,4							
0,7							
1,0							

Для решения этой задачи была использована расчетная схема расщепленной фазы, в которой установлены две распорки, равноудаленные от опор. Затем в процессе проведения вычислительного эксперимента поша-

гово изменялось местоположение распорок с целью определения критических значений длины подпролета. Расчеты проводились в тех же пролетах 100 и 200 м. Основываясь на результатах проведенных расчетных экспериментов (таблицы 4, 5), можно заключить, что если первый от опоры подпролет будет иметь длину 20 % и менее от всей длины пролета, то крутильная стабильность не будет нарушена.

Таблица 4. – Определение критической длины подпролета  $l_{кр}$  для пролета ЛЭП длиной 200 м

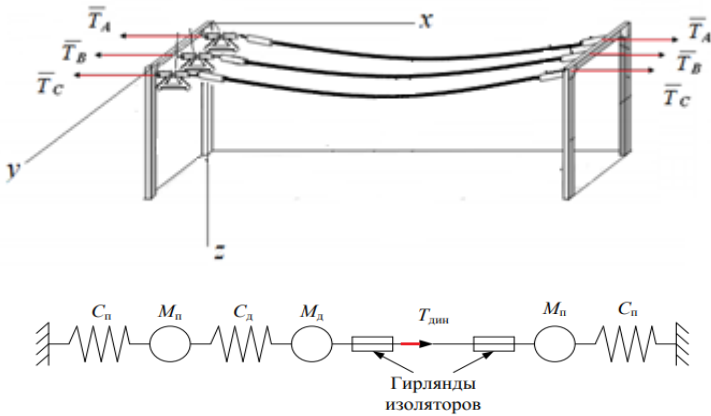
$l$ , м	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$l$ , %	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Зона $l_{кр}$					$l_{кр}$					

Таблица 5. – Определение критической длины подпролета  $l_{кр}$  для пролета ЛЭП длиной 100 м

$l$ , м	5	10	15	20	25	30	35	40	45	80
$l$ , %	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Зона $l_{кр}$					$l_{кр}$					

Подобные исследования были проведены и для фазы, расщепленной на четыре провода. Однако при изменении параметров пролета и проводов в широком диапазоне выявить случаи закручивания фазы не удалось. Поэтому можно сделать предположение, что вероятность нарушения крутильной стабильности в подобных конструкциях мала.

Еще одним новым конструктивным элементом, предназначенным для повышения электродинамической стойкости и аэродинамической стабильности гибких шин ОРУ, является устройство контроля натяжения проводов, или демпфер тяжения. Демпфер устанавливается между порталом и гирляндой изоляторов и ограничивает передачу нежелательных усилий на порталы при КЗ. Для математического моделирования динамики демпфера в качестве расчетных схем его установки были приняты пролеты с натяжными гирляндами изоляторов как наиболее характерные и современные на сегодняшний день. Кроме того, данный факт позволяет получить единообразную расчетную модель: стойка портала – демпфер – гирлянда изолятора – провод в виде последовательно связанных между собой однородных участков и сосредоточенной массы с пружиной для демпфера (рисунок 4).



**Рисунок 4. – Расчетная схема и модель пролета гибкой ошиновки с демпфером тяжения**

В соответствии с принципом освобождения от связей заменим действие проводов, изоляторов и порталов на демпфер реакциями связей, после чего демпфер можно считать свободным материальным телом, и, если учитывать только его продольные перемещения вдоль пролета, уравнения его динамики при КЗ примут следующий вид:

$$M_d \frac{d^2 x}{dt^2} + f_d \frac{dx}{dt} + C_x x = T_{дин}, \quad (4)$$

где  $C_x$  – линейная упругая жесткость демпфера;

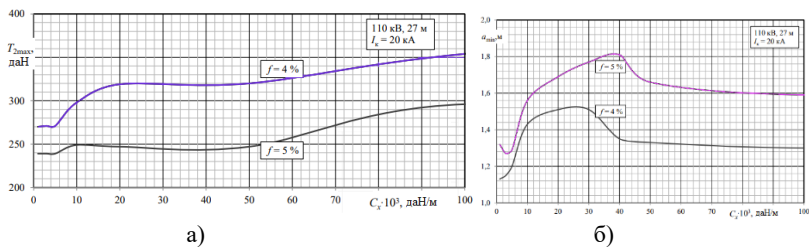
$x$  – координата вдоль пролета;

$f_d$  – вязкостная жесткость демпфера.

Очевидно, что наиболее важным параметром демпфера, с точки зрения его эффективности, является его упругая жесткость  $C_x$ . Из анализа работы демпфера было сделано предположение, что чем меньше она будет, тем меньше будут нагрузки на порталы при КЗ. С другой стороны, чем меньше будет величина упругой жесткости, тем больше будут размах колебаний проводов и риск их недопустимого сближения.

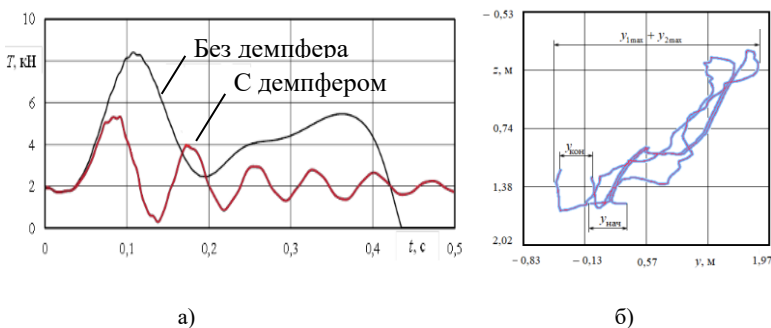
Для подтверждения эффективности применения демпфера были проведены расчеты КЗ для типового пролета ОРУ 110 кВ с одиночными проводами длиной 27 м и для типового ОРУ 330 кВ длиной 48 м с установкой демпфера и без него с расщеплением фазы на два провода. Результаты расчета представлены на рисунках 5, 6.





**а** – второй максимум тяжения  $T_{2\max}$ ; **б** – минимальное расстояние  $a_{\min}$   
**Рисунок 5.** – Тяжение и междуфазное расстояние при КЗ  
 в зависимости от упругой жесткости демпфера

Так, на рисунке 5а, б представлены зависимости тяжений проводов при их сближении и минимального междуфазного расстояния  $a_{\min}$  от параметра упругой жесткости, который изменялся от  $(1-100) \cdot 10^3$  даН/м. Анализируя приведенные диаграммы, можно сделать окончательный вывод, что чем ниже жесткость демпфера, тем лучше он срезает пики тяжений. Однако, если говорить об электродинамической стойкости в целом, необходимо учесть еще один показатель – минимальные междуфазные расстояния  $a_{\min}$  при колебаниях проводников. В принятом диапазоне  $C_x$  произведен расчет сближений проводников при КЗ. Результаты расчета представлены на рисунке 5б. Из графиков видно, что зависимость  $a_{\min} = f(C_x)$  имеет максимум при  $C_x$ , равной  $(15-35) \cdot 10^3$  даН/м. Эти значения могут служить ориентиром для выбора рабочей жесткости демпфера, так как максимальные тяжения в этом диапазоне еще не достигли своих пиков и составляют 50–75 % от аналогичных значений при креплении проводников без демпфера.

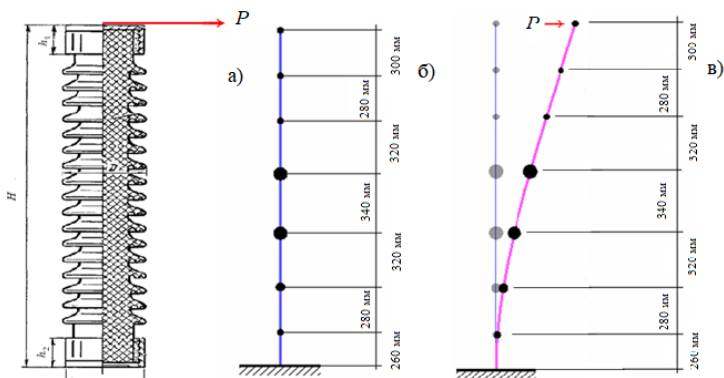


**а** – первый максимум тяжения  $T_{1\max}$ ; **б** – траектория движения проводов фазы  
**Рисунок 6.** – Тяжение и размах проводов в фазе при КЗ

Результаты эксперимента для расцепленной фазы показали, что пик тяжений при установке демпфера уменьшился на 40 % для данного пролета при токе КЗ 30 кА (рисунок 6а). Однако с увеличением параметра  $C_x$  демпфера возрастает размах колебаний, составляющих фазу проводов (рисунок 6б).

**В четвертой главе** проведен анализ влияния динамических нагрузок, передающихся от проводов на основные электрические аппараты при КЗ, подтверждена возможность наступления резонанса при совпадении частот вынужденных и собственных колебаний аппаратов, впервые определены значения динамических нагрузок на основные конструктивные элементы типового ОРУ 110 кВ при наступлении резонанса.

Динамические усилия при КЗ опасны для опорных конструкций и аппаратов распределительных устройств из-за их недостаточной механической прочности. Для определения динамических нагрузок на аппараты последние представляются консольными стержнями с распределенной массой и постоянной жесткостью по высоте аппарата. При этом с одного конца аппарат жестко зашпелен, а с другого подвергается действию динамических усилий, обусловленных тяжениями в проводах (рисунок 7).

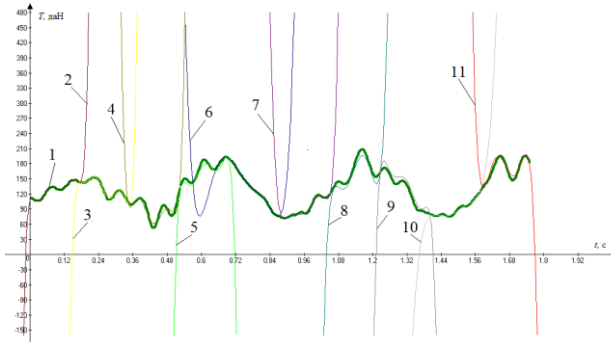


**а** – опорный изолятор; **б** – начальное положение; **в** – действие силы

**Рисунок 7.** – Расчетная модель на примере изолятора марки ИОС

В качестве источника вынужденных колебаний выступают подвижные элементы конструкции, т. е. токоведущие части ОРУ. С помощью ранее разработанных на кафедре компьютерных программ были получены характерные осциллограммы динамических усилий в результате моделирования двухфазного КЗ величиной 30 кА в ячейке типового ОРУ 110 кВ. Далее в результате частичной интерполяции получены кривые, которые на определенных промежутках описывают изначальную осциллограмму динамиче-

ских усилий. Особый интерес представляет кривая 5, так как именно она на промежутке от 0,53 до 0,7 с совпадает с характерным максимумом тяжений, который и принят в качестве расчетного усилия на аппараты, согласно графику, величина этого усилия составила порядка 2000 Н (рисунок 8).



**Рисунок 8. – График динамических тяжений при двухфазном КЗ**

Далее методом регрессивного анализа получим аналитическое выражение, описывающее кривую 5:

$$f(t) = -(7,36 \cdot 10^8)t^6 + (2,71 \cdot 10^9)t^5 - (4,12 \cdot 10^9)t^4 + (3,34 \cdot 10^9)t^3 - (1,51 \cdot 10^9)t^2 + (3,71 \cdot 10^8)t - (3,72 \cdot 10^7). \quad (5)$$

Для частотного анализа данной функции разложим ее в ряд Фурье:

$$f(t) = \frac{a_0}{T} + \sum a_n \cos\left(\frac{\pi n t}{T}\right) + b_n \sin\left(\frac{\pi n t}{T}\right);$$

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-T}^T f(t) dt;$$

$$a_n = \frac{1}{T} \int_{-T}^T f(t) \cos\left(\frac{\pi n t}{T}\right) dt;$$

$$b_n = \frac{1}{T} \int_{-T}^T f(t) \sin\left(\frac{\pi n t}{T}\right) dt;$$
(6)

где  $n = 1, 2, 3, \dots$  – количество учитываемых гармоник.

$$\text{Для наших данных: } T = 0,17; a_0 = \frac{2}{0,17} \int_0^{0,17} f(x) dx = 7678283,65.$$

Окончательно ряд для первых одиннадцати членов имеет вид:

$$f(t) = a_0 + a_1 \cos 18,47t + a_2 \cos 36,94t + a_3 \cos 55,41t + a_4 \cos 73,88t + a_5 \cos 92,35t + a_6 \cos 110,82t + a_7 \cos 129,29t + a_8 \cos 147,76t + a_9 \cos 166,23t + a_{10} \cos 184,71t + a_{11} \cos 203,17t \dots + a_n \cos \left( \frac{\pi n t}{T} \right). \quad (7)$$

Значения частот для первых одиннадцати гармоник ряда представлены в таблице 6.

В ходе выполнения исследования произведен расчет собственной частоты колебаний конструктивных элементов типового распределительного устройства 110 кВ. Расчеты выполнялись по программному комплексу ЛИРА-САПР, который позволяет задавать форму стержня, его размеры, массу, модуль упругости материала, а также момент его сопротивления при изгибе. Результаты расчета для всех основных аппаратов представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Результаты вычислительного эксперимента

Номер гармоники	Частота собственных колебаний выключателя ВГТ-110, Гц	Частота собственных колебаний трансформатора тока ТОГФ-110, Гц	Частота собственных колебаний изолятора ИОС-110, Гц	Частота вынужденных колебаний, Гц
1	0,098442	0,115537	0,0218104	2,9411
2	0,668972	0,887267	0,109845	5,8821
3	1,544166	1,525148	0,320432	8,8232
4	1,951014	2,672495	0,660025	12,3643
5	3,917695	4,516832	0,929676	14,7054
6	4,573155	5,439847	1,51565	17,6464
7	6,540182	7,334938	1,87721	20,5875
8	7,426402	9,139708	2,27408	23,5286
9	9,667251	9,871165	4,32837	26,4697
10	9,994256	12,028049	6,54867	29,4124
11	12,178036	13,554534	8,58072	32,3519

Как видно из таблицы 6, ряд значений частот вынужденных колебаний близок к значениям собственных частот колебаний основных конструктивных элементов. Это означает, что рассматриваемая система потенциально может войти в резонанс, а следовательно, могут возникнуть опасные механические напряжения в материале корпуса аппаратов, которые приведут к их разрушению. В этом случае величина динамического усилия с учетом резонанса будет складываться из величин статического нагружения

и вибрационного нагружения резонансной частоты, приведенного к статической силе посредством коэффициента динамичности. Причем значения статического и вибрационного нагружения – это амплитуды соответствующих членов ряда Фурье (7) на резонансных гармониках

$$G_{\text{дин}} = G_{\text{ст}} + \mu P_0, \quad (8)$$

где  $\mu = \frac{y_{\text{дин}}^{\text{max}}}{y_{\text{ст}}} = \frac{1}{\left(\frac{\Theta}{\omega}\right)^2 - 1}$  – коэффициент динамичности;

$P_0$  – амплитуда колебаний резонансной частоты, даН;

$G_{\text{ст}}$  – статическое нагружение, даН;

$y_{\text{ст}}$  – отклонение аппаратов при статическом нагружении, мм;

$y_{\text{дин}}^{\text{max}}$  – максимальное отклонение аппаратов при вынужденных колебаниях, мм;

$\Theta$  – частота вынужденных колебаний, Гц;

$\omega$  – собственная частота колебаний аппарата, Гц.

Согласно предложенной методике произведены расчеты для основных конструктивных элементов ОРУ. Значения динамических усилий для сопоставления с паспортными данными представлены в таблице 7.

Таблица 7. – Сравнение расчетных и паспортных данных

Тип аппарата	Номинальное напряжение, кВ	Минимальная разрушающая нагрузка на изгиб, даН	Расчетное значение динамического воздействия, даН
ТОГФ	110	180	275 (431)
ВГТ	110	230	583
ИОС	110	600	560

Как видно из таблицы, 7 усилия для измерительного трансформатора ТОГФ и выключателя ВГТ превышают их паспортные значения, следовательно, расчет основных конструктивных элементов ОРУ на динамическое воздействие по приведенной методике необходимо проводить в обязательном порядке. А сама методика будет актуальной для проектных организаций энергосистемы Республики Беларусь.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации выполнены комплекс научно-технических исследований, направленных на совершенствование существующих методов расчета электродинамической стойкости гибких токоведущих конструкций электроустановок с учетом новых конструктивных элементов, и разработка рекомендаций по повышению их стойкости к токам короткого замыкания и субколебаниям.

### **Основные научные результаты диссертации**

В соответствии с поставленной целью в процессе выполнения диссертационных исследований были получены следующие основные научные и практические результаты:

1. Модифицирован упрощенный метод расчета для определения сил сжатия дистанционных внутрифазных распорок, основанный на рассмотрении расщепленной фазы как статической системы [1, 8, 17]. Усовершенствована математическая модель расчета динамических усилий в гибкой ошиновке с расщепленными проводами, оборудованными жесткими и демпфирующими внутрифазными распорками с вращающимися лучами. Проведены расчеты сил сжатия распорок по модифицированной компьютерной программе FAZA, разработанной на кафедре «Электрические станции» БНТУ. Расхождение между расчетными и опытными данными в большинстве случаев не превышает 10–12 % [1, 6, 11]. Выполнена оценка электродинамической стойкости гибкой ошиновки типовых конструкций открытых распределительных устройств 330 и 500 кВ с РФ. Получены зависимости параметров их субколебаний от упруго-вязких характеристик демпфирующих распорок [2, 15].

2. Решена краевая задача расчета параметров крутильной стабильности расщепленной фазы с заданной кратностью расщепления, что позволило определить параметры крутильной стабильности для воздушных линий с расщепленными фазами. Выявлены случаи устойчивого нарушения крутильной стабильности расщепленных фаз. Определены критические длины подпролетов, при которых наиболее вероятно устойчивое нарушение крутильной стабильности. Предложены схемы расстановки распорок, позволяющие уменьшать механические усилия в РФ при КЗ. Выявлено влияние внутрифазного взаимодействия расщепленных проводов и закручивания фазы на ее движение в целом [3, 9, 12].

3. Разработаны алгоритм и метод расчета электродинамической стойкости гибкой ошиновки ОРУ с одиночными и расщепленными проводами, учитывающие влияние демпферов тяжения на динамику составляющих фазу проводов до схлестывания, совместное движение схлестнувшихся участков и раздельное движение проводов после отключения КЗ [4, 7]. Выполнен анализ влияния демпферов тяжения на параметры электродина-

мической стойкости гибкой ошиновки при различных видах короткого замыкания, его продолжительности и в цикле неуспешного АПВ. Методом вычислительного эксперимента определены оптимальные значения параметров упругой податливости демпферов. Было отмечено, что с увеличением упругой податливости демпфера снижается второй максимум тяжения, однако при этом увеличивается размах колебаний проводов на стадии их свободного движения после отключения КЗ, тем самым повышая риск недопустимого сближения проводников соседних фаз [4, 13]. Проведена оценка достоверности результатов расчета по компьютерной программе сравнением расчетных и опытных данных бельгийской фирмы Laborelec. Расхождение между расчетными и опытными данными не превышает 15–20 % [4, 16].

4. Разработана методика расчета электродинамической стойкости конструктивных элементов распределительных устройств, в которой гибкие проводники вместе с аппаратами рассматриваются как единая колебательная система при КЗ. Достоверность расчетов подтверждена сравнением результатов расчета с опытными данными. Выполнен частотный анализ собственных и вынужденных колебаний конструктивных элементов распределительных устройств с целью определения возможности наступления резонанса [5, 10, 14].

5. Впервые определены значения динамических нагрузок на основные конструктивные элементы типового ОРУ 110 кВ при наступлении резонанса. При сопоставлении расчетных значений динамических усилий с паспортными данными замечено, что для всех рассмотренных аппаратов указанные усилия либо превышают допустимые значения, либо составляют 90–95 % от них. Предложены рекомендации по увеличению частоты собственных колебаний конструктивных элементов распределительных устройств, что позволит повысить их механическую прочность при увеличении уровня токов КЗ [5, 18].

#### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

Полученные при выполнении диссертационных исследований результаты, технические и алгоритмические решения могут быть использованы для повышения технического совершенства эксплуатирующихся и проектируемых распределительных устройств с гибкими проводниками.

Также полученные результаты могут быть рекомендованы для использования и реализации в проектных, научно-исследовательских, опытно-конструкторских и других организациях, которые осуществляют проектирование, модернизацию, разработку и исследования электроустановок с гибкими проводниками.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### **Статьи в изданиях, включенных в перечень научных изданий ВАК Республики Беларусь**

1. Сергей, И. И., Потачиц Я. В. Расчет сил сжатия дистанционных расporок расщепленных фаз при коротком замыкании / И. И. Сергей, Я. В. Потачиц // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2014. – № 3. – С. 5–12.

2. Расчет электродинамической стойкости проводов воздушных линий / И. И. Сергей, Е. Г. Пономаренко, П. И. Климкович, А. П. Долин, Я. В. Потачиц // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2015. – № 6. – С. 5–19.

3. Анализ крутильной стабильности расщепленных фаз / И. И. Сергей, Е. Г. Пономаренко, Н. А. Юдина, Я. В. Потачиц // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2019. – Т. 62, № 6. – С. 503–513.

4. Сергей, И. И. Оценка эффективности устройства ограничения тяжелых проводов при коротком замыкании / И. И. Сергей, Е. Г. Пономаренко, Я. В. Потачиц // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2017. – Т. 60, № 4. – С. 309–319.

5. Потачиц Я. В. Исследование возникновения резонанса при воздействии динамических усилий на конструктивные элементы электроустановок / Я. В. Потачиц // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2021. – Т. 64, № 3. – С. 228–238.

### **Материалы конференций и тезисы докладов**

6. Sergey, I. I. Computing experiment for determination of efficiency of the device for short-circuit overloading prevention / I. I. Sergey, E. G. Ponomarenk, Y. V. Potachits // Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review). – 2015. – R.88NR – С. 319–320.

7. Sergey, I. I. New technical solutions for increase in electrodynamic firmness of electroinstallations with flexible conductors / I. I. Sergey, E. G. Ponomarenk, Y. V. Potachits // Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review). – 2019. –R.101NR – С. 214–215.

8. Потачиц, Я. В. Оценка сил сжатия дистанционных расporок расщепленной фазы при коротком замыкании / Я. В. Потачиц, И. И. Сергей // Девятая Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2014»: материалы конф.: в 7 т. – Иваново: ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина», 2014. – Т. 3. – С. 137–141.



9. Потачиц, Я. В. Анализ крутильной стабильности расщепленных фаз / Я. В. Потачиц // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 16-й Междунар. науч.-техн. конф. – Минск : БНТУ, 2018. – Т. 1. – С. 75.

10. Потачиц, Я. В. Анализ электродинамической стойкости основных конструктивных элементов распределительных устройств с гибкой ошиновкой / Я. В. Потачиц // Энергетика Беларуси-2020 [Электронный ресурс]: сб. науч. работ Республиканской науч.-практ. конф. профессорско-преп. состава, науч. работников, докторант. и асп. ЭФ БНТУ (проводится в рамках 72-й науч.-техн. конф. профессорско-преп. состава, науч. работников, докторант. и асп. БНТУ), 10 ноября 2020 г. – Минск: БНТУ, 2021. – С. 120.

11. Потачиц, Я. В. Компьютерная программа расчета электродинамической стойкости шинных конструкций комплектных распределительных устройств / Я. В. Потачиц, Е. А. Дерюгина, П. И. Климкович // Актуальные проблемы энергетики: материалы 65-й науч.-техн. конф. студ. и асп. / Белорусский национальный технический университет, Энергетический факультет. – Минск : БНТУ, 2013. – С. 85–88.

12. Потачиц, Я. В. Критерии крутильной стабильности расщепленной фазы / Я. В. Потачиц // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 16-й Междунар. науч.-техн. конф. – Минск : БНТУ, 2018. – Т. 1. – С. 80.

13. Сергей, И. И. Математическое моделирование электродинамической стойкости гибких шин открытых распределительных устройств с учетом новых конструктивных элементов, начальных и краевых условий / И. И. Сергей, Я. В. Потачиц // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 14-й Междунар. науч.-техн. конф. – Минск : БНТУ, 2016. – Т. 1. – С. 5.

14. Потачиц, Я. В. Модификация алгоритма расчета динамических нагрузок на конструктивные элементы электроустановок / Я. В. Потачиц; редкол.: Е. Г. Пономаренко, Н. В. Шведко // Энергетика Беларуси-2020 [Электронный ресурс]: сб. науч. работ Республиканской науч.-практ. конф. профессорско-преп. состава, науч. работников, докторант. и асп. ЭФ БНТУ (проводится в рамках 72-й науч.-техн. конф. профессорско-преп. состава, науч. работников, докторант. и асп. БНТУ), 10 ноября 2020 г. – Минск : БНТУ, 2021. – С. 119.

15. Сергей, И. И. Расчет максимальных тяжений расщепленных проводов при коротком замыкании / И. И. Сергей, Я. В. Потачиц // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 11-й Междунар. науч.-техн. конф. – Минск: БНТУ, 2013. – Т. 1. – С. 26.

16. Расчет электродинамической стойкости гибких шин распределительных устройств 110–220 кВ с учетом демпферов тяжения / И. И. Сергей, Ю. В. Бладыко, П. И. Климович, Я. В. Потачиц // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 13-й Международ. науч.-техн. конф. – Минск: БНТУ, 2015. – Т. 1. – С. 7.

17. Потачиц, Я. В. Сравнение методов расчета динамики расщепленной фазы при коротком замыкании / Я. В. Потачиц // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 12-й Международ. науч.-техн. конф. – Минск: БНТУ, 2014. – Т. 1. – С. 9.

18. Потачиц, Я. В. Совершенствование метода расчета динамических усилий на конструктивные элементы электроустановок / Я. В. Потачиц; Белорусский национальный технический университет; оргком.: Е. Г. Пономаренко (пред. оргком.) [и др.] // Современные тенденции в развитии экономики энергетики: сб. материалов Международ. науч.-практ. конф., посвященной 100-летию БНТУ, Минск, 3 декабря 2020 г. – Минск: БНТУ, 2021. – С. 111–113.

## РЭЗІЮМЭ

Патачыц Яраслаў Уладзіміравіч

### Удасканаленне метадаў разліку электрадынамічнай устойлівасці канструкцый токавадучых сістэм з гнуткімі праваднікамі

**Ключавыя словы:** матэматычнае мадэляванне, расшчэпленая фаза, круцільная стабільнасць, канструктыўныя элементы, электрадынамічная ўстойлівасць, гнуткія праваднікі, дынамічныя намаганні, вылічальны эксперымент.

**Мэта даследаванняў:** удасканаленне існуючых метадаў разліку электрадынамічнай стойкасці гнуткіх токавадучых канструкцый электраўстановак з улікам новых канструктыўных элементаў і распрацоўка рэкамендацый па павышэнню іх стойкасці да токаў кароткага замыкання і субваганням.

**Метады даследаванняў:** матэматычнае і кампутарнае мадэляванне, тэарэтычны аналіз, вылічальны эксперымент.

**Атрыманя вынікі і іх навізна:** мадыфікаваны метады разліку сіл сціску ўнутрыфазных распорак пры КЗ, які дазваляе пэўна вызначаць значэнні механічных намаганняў, якія ўзнікаюць у расшчэпленай фазе. Удасканалены метады разліку круцільных ваганняў расшчэпленай фазы, які дазваляе з прымальнай дакладнасцю выяўляць выпадкі ўстойлівага парушэння круцільнай стабільнасці. Распрацаваны метады разліку параметраў электрадынамічнай стойкасці гнуткай ашыноўкі АРУ з адзінкавымі і расшчэпленымі правадамі, з улікам уплыву дэмпфераў цяжару на дынаміку праваднікоў. Прапанавана метадыка вызначэння дынамічных нагузак на асноўныя канструктыўныя элементы АРУ з улікам рэзанансу, якая дазваляе распрацоўваць рэкамендацыі, накіраваныя на павышэнне механічнай трываласці электрычных апаратаў.

**Рэкамендацыі па практычнаму выкарыстанні вынікаў, вобласць прымянення:** прапанаваныя навукова-тэхнічныя рашэнні могуць быць выкарыстаны на прадпрыемствах, якія займаюцца распрацоўкай, праектаваннем, мадэрнізацыяй электраўстановак з гнуткімі праваднікамі для павышэння іх тэхнічнай дасканаласці, што пацвярджаецца атрыманай даведкай аб магчымым практычным выкарыстанні вынікаў даследавання ад ААТ «Белэлектрамонтажналадка». Атрыманя вынікі выкарыстоўваюцца ў навучальным працэсе кафедры «Электрычныя станцыі» БНТУ з мэтай павышэння якасці падрыхтоўкі спецыялістаў.

## РЕЗЮМЕ

Потащиц Ярослав Владимирович

### Совершенствование методов расчета электродинамической стойкости конструкций токоведущих систем с гибкими проводниками

**Ключевые слова:** математическое моделирование, расщепленная фаза, крутильная стабильность, конструктивные элементы, электродинамическая стойкость, гибкие проводники, динамические усилия, вычислительный эксперимент.

**Цель исследований:** совершенствование существующих методов расчета электродинамической стойкости гибких токоведущих конструкций электроустановок с учетом новых конструктивных элементов и разработка рекомендаций по повышению их стойкости к токам короткого замыкания и субколебаниям.

**Методы исследований:** математическое и компьютерное моделирование, теоретический анализ, вычислительный эксперимент.

**Полученные результаты и их новизна:** модифицирован метод расчета сил сжатия внутрифазных распорок при КЗ, позволяющий достоверно определять значения механических усилий, возникающих в расщепленной фазе. Усовершенствован метод расчета крутильных колебаний расщепленной фазы, позволяющий с приемлемой точностью выявлять случаи устойчивого нарушения крутильной стабильности. Разработан метод расчета параметров электродинамической стойкости гибкой ошиновки ОРУ с одиночными и расщепленными проводами, с учетом влияния демпферов тяжения на динамику проводников. Предложена методика определения динамических нагрузок на основные конструктивные элементы ОРУ с учетом резонанса, позволяющая разрабатывать рекомендации, направленные на повышение механической прочности электрических аппаратов.

**Рекомендации по практическому использованию результатов, область применения:** предложенные научно-технические решения могут быть использованы на предприятиях, занимающихся разработкой, проектированием, модернизацией электроустановок с гибкими проводниками для повышения их технического совершенства, что подтверждается полученной справкой о возможном практическом использовании результатов исследования от ОАО «Белэлектромонтажналадка». Полученные результаты используются в учебном процессе кафедры «Электрические станции» БНТУ с целью повышения качества подготовки специалистов.

## SUMMARY

Potachits Yaroslav V.

### **Improving methods for calculating electrodynamic stability of structures of current-carrying systems with flexible conductors**

**Keywords:** mathematical modeling, split phase, torsional stability, structural elements, electrodynamic stability, flexible conductors, dynamic forces, computational experiment.

**The goal of research** improvement of existing methods for calculating the electrodynamic stability of flexible current-carrying structures of electrical installations, taking into account new structural elements and development of recommendations to increase their resistance to short-circuit currents and sub-oscillations.

**Methods of research:** mathematics and computer simulations, theoretical analysis, computing experiment.

**Obtained results and novelty:** the method of calculating the compression forces of intraphase struts at short circuit has been modified, which makes it possible to reliably determine the values of mechanical forces arising in the split phase. The method of calculating the torsional oscillations of the split phase has been improved, which makes it possible to identify cases of stable violation of torsional stability with acceptable accuracy. A method has been developed for calculating the parameters of the electrodynamic stability of a flexible open switchgear busbar with single and split wires, taking into account the influence of gravity dampers on the dynamics of conductors. A method for determining dynamic loads on the main structural elements of the open switchgear, taking into account the resonance, is proposed, which allows developing recommendations aimed at increasing the mechanical strength of electrical devices.

**Recommendations on practical use of the results, the field of application:** the proposed scientific and technical solutions can be used at enterprises engaged in the development, design, modernization of electrical installations with flexible conductors, to enhance their technical perfection that is confirmed by the received certificate of possible practical use of research results by JSC «Belelektromontazhnaladka». The obtained results are used in the educational process of the Belarusian National University of Technology at «Power stations» department in order to improve the quality of training.

Научное издание

Потачиц  
Ярослав Владимирович

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА  
ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ КОНСТРУКЦИЙ  
ТОКОВЕДУЩИХ СИСТЕМ С ГИБКИМИ ПРОВОДНИКАМИ

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени кандидата технических наук

по специальности 05.14.02 – Электрические станции  
и электроэнергетические системы

Подписано в печать 14.02.2023. формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Цифровая  
печать. Усл. печ. л. 1,28. Уч.-изд. л. 1,00. Тираж 80. Заказ 82.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный  
технический университет.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014.

Пр. Независимости, 65, 220013,  
г. Минск