

Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере  
Министерство образования и науки Республики Марий Эл  
АНО Поддержки научных разработок «Междисциплинарная Академия Науки и Инноватики»  
ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет»  
ФГБУН «Институт спектроскопии РАН»  
ФГБУН «Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского» Казанского научного центра РАН  
ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»  
ФГБОУ ВО «Марийский государственный университет»  
ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова»  
Российская академия естествознания  
Малое предприятие (бизнес-инкубатор высоких технологий) ООО «ОРОЛ»  
ООО «НПК-Экоблеск»  
Государственный природный национальный парк «Марий Чодра»  
ЧУ «Пансионат Яльчик»

МАТЕРИАЛЫ  
ЧЕТЫРНАДЦАТОЙ МЕЖДУНАРОДНОЙ  
НАУЧНОЙ ШКОЛЫ  
«НАУКА И ИННОВАЦИИ-2019»  
ISS «SI-2019»

Летняя научная сессия АНО ПНР  
«Междисциплинарная Академия Науки и Инноватики»

XIV Международная научная школа-семинар  
«Фундаментальные исследования и инновации:  
нанооптика, фотоника, и когерентная спектроскопия»

Материалы Всероссийского молодежного научного семинара  
«Наука и инновации 2019»

29 июня – 7 июля 2019 года

Йошкар-Ола  
2019

19. Магарян К.А., Каримуллин К.Р., Васильева И.А., Наумов А.В., Григорьев Ю.В.  
ПРОСТРАНСТВЕННО-СПЕКТРАЛЬНЫЕ КОРРЕЛЯЦИИ В ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ  
ЖК-НАНОКОМПОЗИТОВ: ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДАМИ ЛЮМИНЕСЦЕНТНОЙ  
И ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ 104
20. Архиреев И.А., Вашурин Н.С., Воронин Д.Е., Гладышева А.А., Ксенофонтов С.И.,  
Никитин Д.А., Попов И.И., Степанов С.А., Сушенцов Н.И.  
МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ВКЛАДА ЭКСИТОН-ФОНОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ  
В ОДНОРОДНОЕ УШИРЕНИЕ КВАНТОВЫХ УРОВНЕЙ ТРИОННОГО СОСТОЯНИЯ И  
СПЕКТРАЛЬНОЙ ЛИНИИ РЕЗОНАНСНОГО ПЕРЕХОДА В ПЛЕНКЕ Si(P)/Si(B)/ZnO 110
21. Козырев А.Г., Мороз А.В., Михеева Е.В.  
ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ НА  
ОСНОВЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК РАЗЛИЧНОГО ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА 117
22. Попов И.И., Данилова М.А., Мороз А.В., Никитин Д.А., Попов Д.Ю.,  
Степанов С.А., Сушенцов Н.И., Федоров Б.А.  
ВИХРЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ КРИСТАЛООБРАЗОВАНИЯ ТЕКСТУРИРОВАННЫХ  
ТОНКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК НАНОРАЗМЕРНОЙ ТОЛЩИНЫ 125

#### IV ФИЗИКА-МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ-ТЕХНОЛОГИИ-ОБОРУДОВАНИЕ

23. Иванова Л.С., Филимонов В.Е.  
РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ДАТЧИКА ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА  
ДЛЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ 132
24. Орлов А.И., Самойлов К.А.  
ВЫБОР ЕМКОСТИ БАЛАНСИРУЮЩЕГО НАКОПИТЕЛЯ  
ПРИ СГЛАЖИВАНИИ ПИКОВ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ 137
25. Садыков М.Ф., Ярославский Д.А., Иванов Д.А., Горячев М.П., Галиева Т.Г.,  
Тюрин В.А., Сайфутдинова А.Р.  
СИСТЕМА МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ  
ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ, УЧИТЫВАЮЩАЯ УГОЛ КРУЧЕНИЯ ПРОВОДА 142
26. Садыков М.Ф., Ярославский Д.А., Иванов Д.А., Горячев М.П., Галиева Т.Г.,  
Тюрин В.А., Муртазина Г.Р.  
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СЕТЬ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ  
ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НА ОСНОВЕ МОДУЛЬНЫХ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ 149
27. Сидорова В.Т., Рокина Е.Г.  
ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОЙ КОМПЕНСАЦИИ  
РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ВОЗДУШНЫХ СЕТЯХ 0,4 КВ 158
28. Сипатдинов А.М., Мороз А.В., Михеева Е.В.  
УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ И КОНТРОЛЯ ПОКРЫТИЙ НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ 162
29. Грачев А.С.  
СНИЖЕНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕЛИНЕЙНОСТИ  
НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ СВЕТОДИОДНЫХ ЛАМП 165

#### V НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

30. Митрасов Ю.Н., Козлов В.А., Авруйская А.А., Медякова О.Б., Кондратьева О.В.  
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СРЕДЫ ОКРУЖЕНИЯ НА ФЛУОРЕСЦЕНТНЫЕ  
СВОЙСТВА 4-АЗА-4-АРИЛ-1-ГИДРОКСИМЕТИЛ-10-ОКСА-3,5-ДИОКСО-  
ТРИЦИКЛО[5.2.1<sup>1.7</sup>.0<sup>2.6</sup>]ДЕЦ-8-ЕНОВ 166

#### VI ЖИВЫЕ СИСТЕМЫ И ИХ ИННОВАЦИОННАЯ ПРИВЛЕКАТЕЛЬНОСТЬ

31. Волков В.Е.  
КЛАССИФИКАЦИЯ ПОСТКОЛЭКТОМИЧЕСКИХ СИНДРОМОВ 174
32. Волков В.Е., Волков С.В.  
ДИАГНОСТИКА И ЛЕЧЕНИЕ НЕСОСТОЯТЕЛЬНОСТИ ШВОВ ДУОДЕНАЛЬНОЙ  
КУЛЬТИ ПОСЛЕ РЕЗЕКЦИИ ЖЕЛУДКА И ГАСТРЭКТОМИИ 176
33. Волков В.Е., Волков С.В.  
РОЛЬ ХИРУРГИЧЕСКОЙ САНАЦИИ САЛЬНИКОВОЙ СУМКИ И ЗАБРЮШИННОЙ  
КЛЕТЧАТКИ У БОЛЬНЫХ ОСТРЫМ НЕКРОТИЧЕСКИМ ПАНКРЕАТИТОМ 181

## СИСТЕМА МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ, УЧИТЫВАЮЩАЯ УГОЛ КРУЧЕНИЯ ПРОВОДА

М.Ф. Садыков, Д.А. Ярославский, Д.А. Иванов, М.П. Горячев, Т.Г. Галиева,  
В.А. Тюрин, А.Р. Сайфутдинова

*Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия*  
goryachev91@mail.ru\

Механические деформации при растяжении провода вызывает его вращение вокруг своей оси, что позволяет получить дополнительную информацию о поведении провода на воздушной линии электропередачи и рассматривать её уже не как группу участков из одного пролёта, а как целый взаимосвязанный участок с перераспределением механических нагрузок между пролетами.

Для определения силы тяжения провода по его кручению разработана методика определения механических параметров воздушной линии электропередачи на основе инклинометрического метода и теории силового расчёта стальных канатов. Данная методика учитывает кручение, угол наклона и температуру провода.

Методика реализована в системе мониторинга состояния воздушных линий электропередачи, учитывает угол кручения провода, позволяет предупредить аварийные ситуации на воздушной линии электропередачи благодаря определению силы тяжения провода, контролю дефектов проволок проводов воздушной линии электропередачи и дефектов в подвесной арматуре. Система мониторинга включает в себя устройства контроля, пункт сбора данных и обработки данных, программный комплекс диспетчера.

Устройства контроля устанавливаются непосредственно на провод/грозотрос воздушной линии электропередачи, измеряют угол вращения, угол наклона и температуру провода. Пункт сбора данных и обработки данных осуществляет их обработку согласно разработанной методике в специализированном программном обеспечении. Система мониторинга состояния воздушных линий электропередачи на основе инклинометрического метода позволяет предупредить аварийные ситуации и снизить экономические затраты на содержание и восстановление воздушных линий электропередачи.

**Ключевые слова:** воздушная линия электропередачи, провод, грозотрос, тяжение, инклинометрический метод, система мониторинга

**Введение.** Передача электрической энергии от электростанций или подстанций к потребителю осуществляется по линиям электропередачи (преимущественно, воздушным), которые являются частью электрической системы. Воздушной линией электропередачи (ВЛ) называется устройство для передачи электрической энергии по проводам, расположенным на открытом воздухе и закрепленным с помощью изоляторов и линейной арматуры к опорам.

Протяжённость воздушных линий электропередачи в Российской Федерации составляет свыше 2,8 млн. км [1]. Электросетевое хозяйство стремительно устаревает. Уровень износа оборудования достигает 70%. При этом, в связи с ростом потребления электроэнергии и вводом в строй новых участков ВЛ повышается необходимость контроля состояния ВЛ и прогнозирования возможных аварийных ситуаций.

Неотъемлемыми элементами воздушной линии электропередачи являются провод, изоляторы с линейной арматурой, а также несущие конструкции (опоры и фундаменты). Указанные элементы испытывают механические нагрузки и могут быть повреждены в случае превышения своего предела по механической прочности. Воздушные линии электропередачи сооружаются в районах с различными климатическими условиями, которые оказывают влияние на механическую прочность элементов ВЛ и на характер внешних воздействий.

Конструктивные элементы ВЛ испытывают как горизонтальные (например, механические напряжения в натянутом проводе), так и вертикальные нагрузки (например, от собственного веса или от веса провода). Провод является элементом воздушной линии, на котором наблюдаются изменения механических нагрузок. Это происходит из-за изменения силы натяжения провода в зависимости от температуры, образования на нём гололёдно-изморозевых отложений (ГИО), и колебаний от порывов ветра. Основные механические напряжения в проводе ВЛ связаны с его растяжением. С увеличением предела прочности провода или проволок (жил), из которых он изготовлен, увеличивается и натяжение, которое он способен выдержать [2].

Механическая перегрузка конструктивного элемента линии электропередачи может произойти в связи с появлением ГИО, развитием усталости конструктивного элемента воздушной линии, ошибками при сооружении линии, а также проведением ремонтно-восстановительных работ. Среди перечисленных причин наиболее серьезными последствиями сопровождается появление ГИО. Таким образом, необходима достаточно точная локализация аварийного участка или дефекта, и это при условии, что часто проезд вдоль ВЛ затруднён (глубокие снежные сугробы; естественные преграды, болотистая местность, рельеф и пр.), а скорость предотвращения / устранения аварийной ситуации напрямую связана с понесенными убытками.

**Модель инклинометрического метода.** Перспективным методом определения механических нагрузок на провод является инклинометрический метод, основанный на измерении угла наклона различных предметов относительно гравитационного поля земли. Точность данного метода может быть повышена благодаря установке датчиков с высокой точностью определения угла наклона провода, использованию методики пересчёта данных с устройства в текущие механические нагрузки на проводе. Это возможно благодаря тому, что *при растяжении провода/грозотроса наблюдается его вращение вокруг своей оси*, что позволяет *получить дополнительную информацию*, а значит и *улучшить инклинометрический метод*.

Провода и грозотросы для ВЛ имеют многопроволочную структуру и представляют собой канат, скрученный из отдельных проволок и обладающий большой гибкостью.

После скрутки каждая проволока, кроме одной центральной, располагается по винтовой линии. На рис. 1 показаны изображения проводов и грозотросов, применяемых на ВЛ.



Рис. 1. Изображения проводов и грозотросов: а – провод А-70; б – провод АС – 120/19; грозотрос ГТК -50

Механические деформации при растяжении провода/грозотроса позволяют наблюдать его вращение вокруг своей оси [А1], получать дополнительную информацию и рассматривать ВЛ не как группу участков из одного пролёта, а как целый взаимосвязанный участок с перераспределением механических нагрузок между пролетами.

Исходя из того, что многопроволочные провода и грозотросы по структуре схожи с канатами, для оценки их вращения вокруг своей оси мы используем теорию силового расчёта стальных канатов [ ] применительно к существующему инклинометрическому методу, учитывая температурные расширения и упругие деформации в проводе. Таким образом, была получена зависимость силы тяжения провода от углов кручения и наклон и температуры провода:

$$T = \frac{\alpha^*(l + L_0 \cdot ch(u)) - \sqrt{(\alpha^*)^2(l + L_0 \cdot ch(u))^2 - 8(\alpha^*)^2 L_0(\varphi_1 - \varphi_0) \frac{B}{C}}}{2\alpha^* L_0 \cdot \cos(\alpha)},$$

где  $\alpha^*$  – удельное относительное удлинение провода, Н<sup>-1</sup>;  
 $l$  – длина пролёта, м;

$$u = \ln \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\alpha}{2}\right),$$

где  $\alpha$  – угол наклона провода у точки подвеса по отношению к прямой, проходящей через точки подвеса данного пролёта;

$B$  – коэффициент жесткости провода, Н·м<sup>2</sup>;

$C$  – коэффициент жесткости провода, Н·м;

$L_{0g}$  – длина нерастянутого провода при текущей температуре, м;

$\varphi_1$  – угол поворота провода вокруг своей оси при текущих механических нагрузках на провод при температуре окружающей среды до появления ГИО, град.;

$\varphi_0$  – начальный угол поворота провода вокруг своей оси до появления ГИО, град.

Численный расчёт параметров грозотроса в пролёте показывает, что модель правдоподобно реагирует на изменение угла кручения, подтверждая правильность заложенных в неё физико-механических принципов.

Однако, на практике использовать данную методику на основе улучшенного инклинометрического метода представляется возможным лишь при углах кручения провода/грозотроса до 180°, что обусловлено конструктивными ограничениями кручения провода/грозотроса при креплении его к опоре. Таким образом, диаметр гололёдной муфты для расчёта грозогрозотроса С-50 не должен превышать 12,5 мм и только для пролётов с одной анкерной опорой.

Результирующая зависимость угла кручения грозотроса от его силы тяжения в диапазоне практического применения разработанной методики представлена на рис. 2.

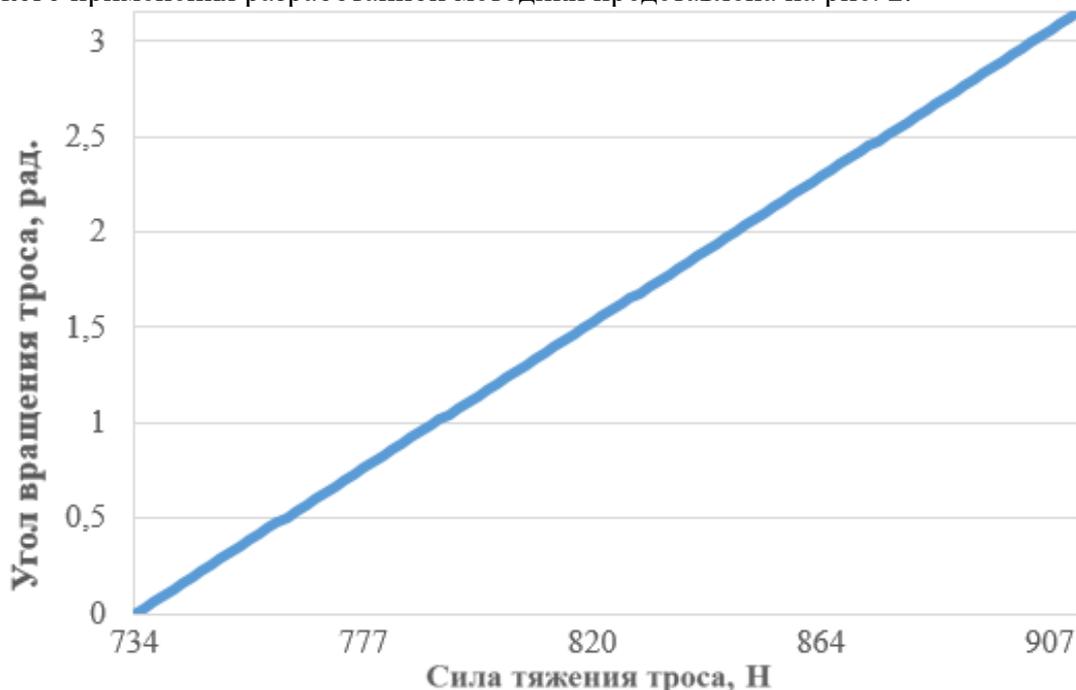


Рис. 2. Зависимость угла кручения грозотроса от его силы тяжения в диапазоне практического применения разработанной методики

Достоинствами модели инклинометрического метода являются:

- возможность оценки упругих взаимодействий в проводе/грозотросе;
- возможность оценки температурного воздействия на механические нагрузки проводов/грозотросов;
- наличие зависимости параметров механических нагрузок от угла кручения провода/грозотроса вокруг своей оси, что актуально ввиду большего диапазона работы устройства контроля по углу кручения, чем по углу наклона;
- возможность определения начального угла кручения устройства контроля благодаря этапу калибровки.

**Аппаратно-программное обеспечение.** Система мониторинга состояния воздушных линий электропередачи состоит из специального набора аппаратно-метрологических средств (устройств контроля) и специализированного программного обеспечения (ПО). Устройства контроля закреплены на проводе/грозотросе вблизи точки подвеса. Данные с устройств контроля собираются на пункте сбора данных, а затем передаются на облачный сервер, откуда они поступают на электронную вычислительную машину (ЭВМ), где обрабатываются согласно разработанным методикам в специализированном ПО. Обработанные данные доступны для диспетчеризации и наблюдения посредством web-интерфейса.

ПО работает не только с данными угла наклона провода при определении механических нагрузок на ВЛ, но и с данными по углу кручения. Математическая модель ПО высчитывает силу тяжения провода на основе величин физико-механических характеристик проводов, длины нерастянутого провода, а также измеренных устройствами контроля параметров.

**Практическое применение разработанной системы мониторинга состояния воздушных линий электропередачи.** Система мониторинга состояния воздушных линий электропередачи определяет механические нагрузки на проводах/грозотросах ВЛ. Механические нагрузки, преимущественно, обусловлены температурными изменениями геометрии провода/грозотроса, появлением ГИО на проводах/грозотросах ВЛ, так как концы провода/грозотроса в пролете ВЛ жестко зафиксированы крепежной арматурой. Следовательно, определение механических параметров ВЛ позволяет проводить контроль как ГИО, так и дефектов на ВЛ.

Для верификации разработанного метода было проведено сравнение с классическим инклинометрическим методом по получаемому тяжению в точке подвеса. Исходными данными для расчета служат реальные значения углов провеса и кручения провода, полученные с устройств контроля системы мониторинга ВЛ.

Проведён расчёт силы тяжения ВЛ 6кВ с проводом А-70 на основе реальных данных для случаев без ГИО и с ГИО.

Расчёт ВЛ без ГИО проводился для пролёта протяжённостью 40,9 метра с проходными опорами. Геометрические параметры ВЛ определялись исходя из фотограмметрии полученных снимков ВЛ [А14, А15]. Температура провода изменялась от -7,40 °С до 13,05 °С. Угол наклона провода за это время изменялся от 1,76 ° до 3,10 °, а угол кручения провода за это время изменялся от 1,75 ° до 4,14 °. Был проведён расчёт по классической методике, а также по разработанной, учитывающей не только угол наклона провода, но и угол его кручения. Результирующая сила тяжения по старой методике изменяется от 942 Н до 1595 Н, по новой – от 942 Н до 1649 Н.

Диаграмма, описывающая случай без ГИО представлена на рис. 5. Из диаграммы на рис. 5 следует, что силы тяжения провода, вычисленные исходя из классического метода и вновь разработанного совпадают. Это доказывает работоспособность разработанной модели. Из диаграммы видно, что с увеличением температуры увеличивается угол наклона, а провод раскручивается. При этом, уменьшается сила тяжения провода. Поведение разработанной модели не противоречит физическим законам теплового расширения тел.

Расчёт ВЛ с ГИО проводился для пролёта протяжённостью 39,6 метра с одной анкерной опорой. Геометрические параметры ВЛ определялись исходя из фотограмметрии полученных снимков ВЛ [А14, А15]. Диаграмма, описывающая случай с ГИО представлена на рис. 6.

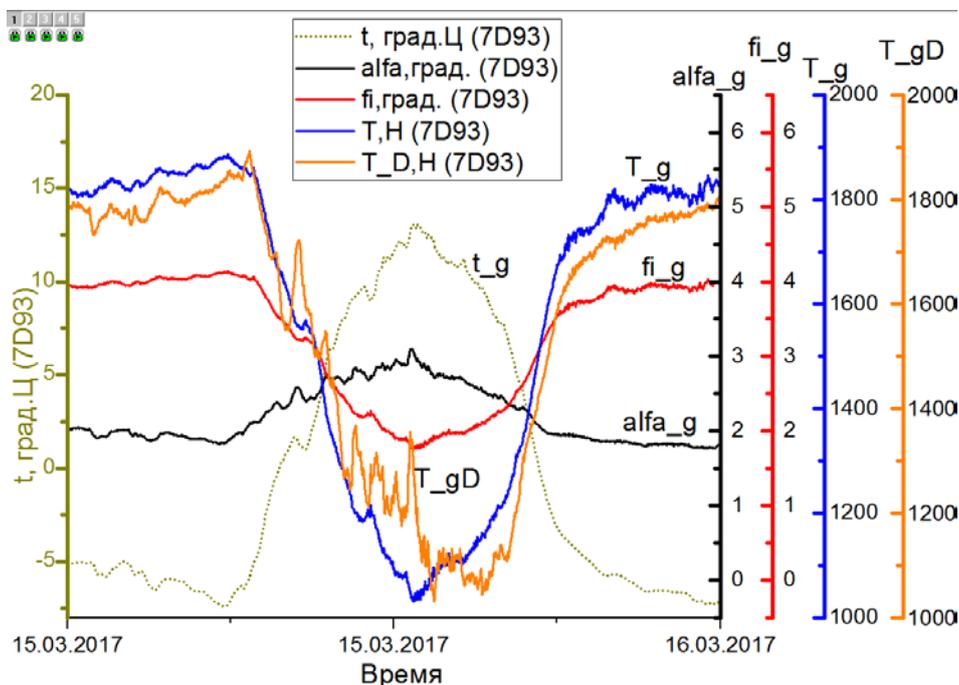


Рис. 5. Поведение провода при отсутствии ГИО:

t – температура провода; alfa – угол наклона провода; fi – угол кручения провода; T\_D – сила тяжения провода, вычисленная по старой методике; T – сила тяжения провода, вычисленная по новой методике

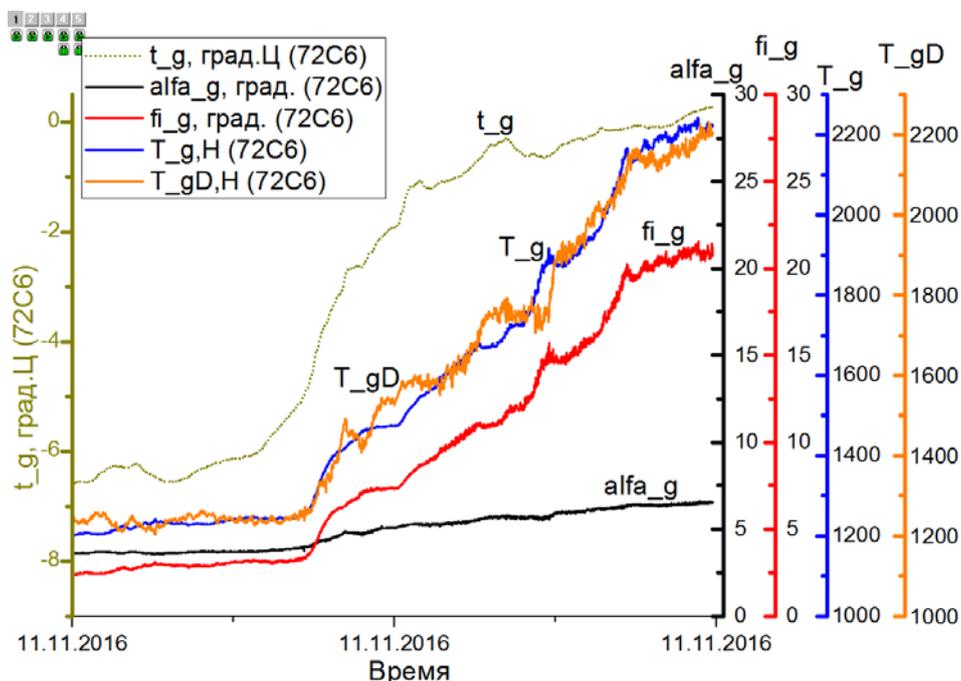


Рис. 6. Поведение провода с ГИО:

t – температура провода; alfa – угол наклона провода; fi – угол кручения провода; T\_D – сила тяжения провода, вычисленная по старой методике; T – сила тяжения провода, вычисленная по новой методике

Температура провода изменялась от  $-6,93\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $0,29\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Угол наклона провода за это время изменялся от  $2,22\text{ }^{\circ}$  до  $3,8\text{ }^{\circ}$ , а угол кручения провода за это время изменялся от  $15,64\text{ }^{\circ}$  до  $35,54\text{ }^{\circ}$ . Был проведён расчёт по классической методике, а также по новой. Результирующая сила тяжения по классической методике изменяется от  $1162\text{ Н}$  до  $2252\text{ Н}$ , по новой – от  $1161\text{ Н}$  до  $2254\text{ Н}$ .

Сравнивая два этих случая, наблюдается увеличение отношения диапазона изменения угла вращения по отношению к диапазону изменения угла наклона провода при увеличении действующей на провод силы тяжения.

**Определение дефектов проволок провода ВЛ.** Результаты экспериментальных исследований влияния дефектов разрыва жил провода на его вращение (кручение) сведены в графики и представлены на рис.7 (А-70) и рис.8 (АС-120/19).

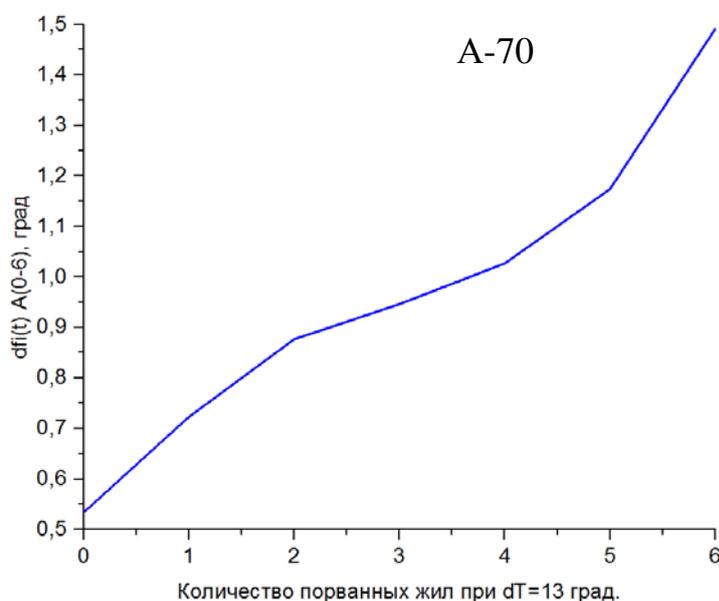


Рис. 7. Зависимость угла кручения провода А-70 от количества оборванных жил (от 0 до 6) при изменении температуры провода на  $13^{\circ}\text{C}$

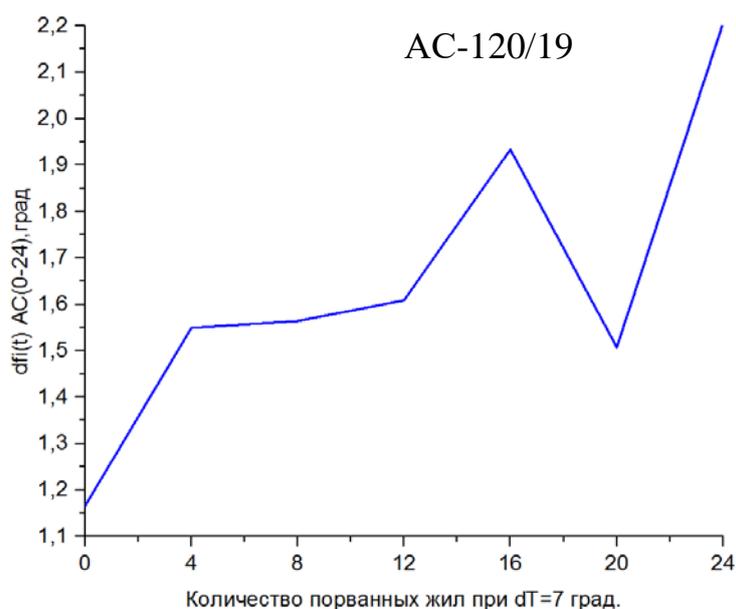


Рис. 8. Зависимость угла кручения провода АС-120/19 от количества оборванных жил (от 0 до 24) при изменении температуры провода на  $7^{\circ}\text{C}$

При развитии дефекта обрыва жил провода А-70 наблюдается, практически, линейное увеличение изменения угла вращения (рис.7), что говорит о возможности диагностирования степени развития дефекта по изменению угла вращения провода при изменении температуры провода в заданном диапазоне.

При развитии дефекта обрыва жил провода АС-120/19 наблюдается увеличение изменения угла кручения (рис.8), что свидетельствует о возможности диагностирования степени развития дефекта по изменению угла кручения провода при изменении температуры провода в заданном диапазоне. Снижение же диапазона изменения угла кручения связано с разрывом всего внешнего слоя алюминиевых жил провода и тем, что каждый слой провода имеет противоположное направление свивки.

Следовательно, при развитии дефекта, связанного с обрывом жил провода наблюдается увеличение диапазона изменения угла кручения провода при одинаковом изменении температуры провода.

### Заключение

Обосновано практическое применение системы мониторинга состояния воздушных линий электропередачи на основе улучшенного инклинометрического метода. В данной статье доказана работоспособность системы мониторинга состояния воздушных линий электропередачи на основе улучшенного инклинометрического метода при решении задач мониторинга, как:

- определение механических нагрузок на провода/грозотросы ВЛ как при наличии, так и при отсутствии ГИО;
- выявление и контроль развития дефектов провода, связанных с разрывом его жил (проволоков).

### Список литературы

1. Боков Г. Техническое перевооружение российских электрических сетей. Сколько это может стоить? Новости Электротехники. 2002. №2(14). URL: <http://www.news.elteh.ru/arh/2002/14/03.php>.
2. Бошнякович Андрей Драгомирович. Механический расчет проводов и тросов линий электропередачи. М.-Л., Госэнергоиздат, 1962. 254 стр.
3. Mikhail Petrovich Goryachev, Yaroslavsky Danil Aleksandrovich, Marat Ferdinandovich Sadykov, Dmitry Alekseevich Ivanov, Andrey Borisovich Konov. "Methodology of ice coating monitoring on overhead transmission lines considering misalignment using wireless communication channel sensors." // *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences* 12.22 (2017): 6479-6482.
4. Горячев М.П., Ярославский Д.А., Абдуллоев А.А., Баймухаметов З.Г. Анализ геометрических параметров ЛЭП для верификации стрел провиса провода // Сборник трудов XII Всероссийской открытой молодежной научно-практической конференции «Диспетчеризация и управление в электроэнергетике» (1–3 ноября 2017 г.) г. Казань: ФГБОУ ВО КГЭУ, 2017. С. 470-475.
5. Mikhail Petrovich Goryachev, Dmitry Alekseevich Ivanov, Danil Aleksandrovich Yaroslavsky, Marat Ferdinandovich Sadykov, Tatyana Gennadyevna Yambaeva. "Investigations of topological features of construction an intelligent overhead power transmission line based on wireless sensors" // *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. –2017. – 8 (12): p.903-908.