

(19)



**Евразийское  
патентное  
ведомство**

(11) **043586**

(13) **B1**

**(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ**

**(45)** Дата публикации и выдачи патента  
**2023.06.02**

**(51)** Int. Cl. **G01R 27/16** (2006.01)

**(21)** Номер заявки  
**202293002**

**(22)** Дата подачи заявки  
**2022.11.17**

---

**(54) СПОСОБ КОНТРОЛЯ НАКОПЛЕНИЯ УСТАЛОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ ПРОВОДОВ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ**

---

**(31)** 2021139662

**(32)** 2021.12.29

**(33)** RU

**(43)** 2023.05.25

**(71)(73)** Заявитель и патентовладелец:  
**ФЕДЕРАЛЬНОЕ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО  
ОБРАЗОВАНИЯ  
"НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ "МЭИ" (ФГБОУ ВО  
"НИУ "МЭИ") (RU)**

**Курьянов Василий Николаевич,  
Султанов Махсуд Мансурович, Норов  
Джонибек Шералиевич, Брунков  
Павел Николаевич, Левин Александр  
Алексеевич, Прасолов Никита  
Дмитриевич (RU)**

**(74)** Представитель:  
**Саленко А.М. (RU)**

**(56)** RU-C1-2608889  
JP-A-2004354248  
US-B2-10261119  
В.Г. КУЛЬКОВ и др. Экспериментальные исследования усталостной прочности и поверхностного электросопротивления алюминиевого провода воздушных линий электропередач. Надежность и безопасность энергетики. 2021 г., том 14, №4, с. 189-195

**(72)** Изобретатель:  
**Кульков Виктор Геннадьевич,  
Тышкевич Владимир Николаевич,**

---

**(57)** Изобретение относится к электроэнергетике и может быть использовано для контроля уровня накопления усталостных повреждений проводов воздушной линии электропередачи (ЛЭП). Для повышения точности определения уровня накопления усталостных повреждений уровень накопления усталостных повреждений определяют по изменению поверхностного активного сопротивления первого участка провода на подвесном зажиме, изменение поверхностного активного сопротивления первого участка провода определяют по разности активных сопротивлений со вторым участком провода той же длины, расположенным на удалении от места подвеса; измерение поверхностного активного сопротивления двух участков провода осуществляется по мостовой схеме при пропускании импульса тока высокой частоты; измерения осуществляются периодически автономным устройством, устанавливаемым на опоре с наиболее нагруженным пролётом контролируемого участка линии, результаты измерений передаются диспетчеру. Технический результат - повышение надежности контроля технического состояния провода.

---

**B1**

**043586**

**043586**

**B1**

Изобретение относится к электроэнергетике и может быть использовано для контроля уровня накопления усталостных повреждений проводов воздушной линии электропередачи (ЛЭП).

Известен электропотенциальный контроль степени повреждения металла кольцевых сварных соединений путем измерения электрического сопротивления, способ измерения глубины трещины электропотенциальным методом (патент РФ № 2527311, МПК G01N 27/20, опубл. 27.08.2014; Шкатов П.Н. Электропотенциальный контроль качества кольцевых сварных соединений/П.Н. Шкатов, А.В. Водовозов//Тез. Докл. Российской НТК "Не разрушающий контроль и диагностика". М.: РОНКТД, 1999. т.1. С. 157), заключающийся в том, что по изменению электрического сопротивления в направлениях, параллельном и перпендикулярном трещине, можно сделать вывод о ее глубине. Измерение сопротивления образцов вырезанных из сварного шва осуществляется по мостовой схеме четырехконтактным методом.

Недостатки электропотенциальных методов заключаются в том, что для их осуществления необходимо знать местоположение трещины, кроме того, устанавливая зондовые электроды всякий раз в зависимости от ее расположения. В случае контроля состояния проводов неизвестно расположение поверхностных дефектов. Размеры трещин являются микронными, их множество и их направление и глубина различны. Кроме того, проблематично их применение для многожильных проводов с небольшими диаметрами отдельных проволок.

Известен способ контроля накопления усталостных повреждений в проводах ЛЭП по показаниям регистраторов вибрации, устанавливаемых на проводах действующих линий (РД 34.20.182-90 Методические указания по типовой защите от вибрации и субколебаний проводов и грозозащитных тросов воздушных линий электропередачи напряжением 35-750 кВ). Информация о числе циклов колебаний провода, накопленная за период измерений, может быть использована для расчетной оценки срока службы проводов до появления усталостных повреждений провода. При расчетах используется рекомендуемая кривая безопасных напряжений СИГРЭ (СИГРЭ - Международный Совет по большим электрическим системам высокого напряжения).

Недостатком описанного способа контроля накопления усталостных повреждений, остаточного ресурса проводов воздушных линий является неточность оценки реального напряженно-деформированного состояния материала провода (учитывается в основном  $\sigma_a$  - амплитуда изгибных напряжений) и предельного состояния провода по кривой безопасных напряжений СИГРЭ.

Известны способы контроля технического состояния проводов ЛЭП с использованием высокочастотных сигналов в виде бегущей волны (патент РФ № 110555, МПК H02G 7/16, опубл. 20.11.2011; патент РФ № 180993, МПК G01R 31/00, опубл. 03.07.2018). Согласно этим способам высокочастотный сигнал в виде бегущей волны посылается от излучателя вдоль провода, отражается, принимается и затем обрабатывается. По изменению параметров принятого сигнала получают информацию о техническом состоянии провода. В блоке цифровой обработки сигналов производится обработка принятого сигнала, выделение полосы отраженного сигнала средствами цифровой фильтрации, фиксируется время, через которое пришел отраженный сигнал. Производится вычисление амплитудно-частотного спектра рефлектограммы методом преобразования Фурье и обратного восстановления.

Недостатком этих способов является, кроме использования сложной цифровой обработки, необходимость установки на действующей линии двух высокочастотных заградителей по обе стороны от излучателей, что связано с отключением линии и необходимостью ее временного разрыва.

Известно использование методов магнитной дефектоскопии для оценки остаточных напряжений, технического состояния проводов воздушных линий электропередач (Оценка технического состояния воздушных линий электропередач методами магнитной дефектоскопии. Волоховский В.Ю., Воронцов А.Н., Сухоруков В.В., Цуканов В.В., Шкапцов В.А., Артемьев М.С., Чернецов В.В. Энергия единой сети. 2016. № 1 (24). С. 42-51). Диагностическая информация, получаемая методом магнитной дефектоскопии, сама по себе не позволяет судить об изменении несущей способности проводов и грозотросов с инженерной точки зрения. Однако диагностические параметры, такие как величина потери сечения и/или данные об обрывах проволок, могут быть использованы в качестве входных при формировании рассматриваемых далее механических моделей провода или грозотроса. Такой подход к использованию результатов магнитной дефектоскопии позволяет методами механики конструкций определить ряд прочностных показателей, по которым можно делать объективные выводы о техническом состоянии обследованных объектов.

Недостатком способа является недостаточная чувствительность, точность определения уровня накопления усталостных повреждений. При зарождающемся и развивающемся усталостном повреждении изменяются характеристики только приповерхностного слоя достаточно малой толщины.

К недостаткам можно отнести и сложность технической, приборной реализации контроля.

Наиболее близким техническим решением к заявляемому способу является способ контроля накопления усталостных повреждений проводов воздушной линии электропередачи, раскрытый в патенте РФ № 2542597, МПК G01R 27/16, опубл. 20.02.2015, и заключающийся в том, что измеряют напряжение и ток в первом и втором местоположениях на линии электропередачи, при этом измерение напряжений и токов в первом и втором местоположениях синхронизируют по времени. По измеренным напряжениям и токам определяют полное сопротивление линии электропередачи между первым и вторым местоположе-

ниями. Определяют температуру проводов линии электропередачи. Измерения проводят при различных температурах. Находят температурный коэффициент сопротивления в каждом случае и их сравнивают между собой. По величине различия судят о степени дефектности провода.

Недостатком способа является недостаточная чувствительность, точность определения уровня накопления усталостных повреждений. При зарождающемся и развивающемся усталостном повреждении изменяются характеристики только приповерхностного слоя достаточно малой толщины. В приведенном способе используется промышленная частота, на которой поверхностного эффекта практически нет. Поэтому температурный коэффициент сопротивления здесь является интегральной характеристикой для всей толщины провода. Роль поверхностного слоя пренебрежимо мала.

Технической задачей изобретения является повышение чувствительности и точности определения уровня накопления усталостных повреждений проводов воздушной линии электропередачи для оценки технического состояния провода.

Техническим результатом изобретения является повышение надежности контроля технического состояния провода.

Указанный технический результат достигается тем, что в способе контроля накопления усталостных повреждений проводов воздушной линии электропередачи, включающем измерение напряжения и тока в первом местоположении на линии электропередачи, измерение напряжения и тока во втором местоположении на линии электропередачи, при этом измеренные напряжения и токи в первом и втором местоположениях синхронизированы по времени, определение сопротивления линии электропередачи между первым и вторым местоположениями, согласно изобретению, на линии электропередачи выбирают первый участок провода в месте подвеса провода на опору и второй участок провода той же длины, что и первый, расположенный на удалении от места подвеса, измеряют напряжения и токи в первом и втором местоположениях первого и второго участков, принимая первое и второе местоположения первого участка соответственно в начале и конце первого участка, а первое и второе местоположения второго участка соответственно в начале и конце второго участка, определяют активное сопротивление первого и второго участков провода линии, уровень накопления усталостных повреждений материала провода определяют по изменению поверхностного активного сопротивления первого участка провода, причем это изменение определяют по разности активных сопротивлений со вторым участком провода, при этом измеряют активное сопротивление двух участков провода по мостовой схеме при пропускании импульса тока высокой частоты, измерения осуществляют периодически автономным устройством, устанавливаемом на опоре воздушной линии электропередачи наиболее нагруженного пролёта, результаты измерений передают диспетчеру.

Сущность предлагаемого способа контроля накопления усталостных повреждений проводов воздушной линии электропередачи поясняется чертежами, где на фиг. 1 приведена блок-схема автономного устройства контроля накопления усталостных повреждений, реализующего предлагаемый способ, на фиг. 2 приведены зависимости сопротивления провода марки АС95 длиной 1,2 м от частоты в диапазоне от 20 Гц до 2 МГц для трех случаев: для целого провода и для провода с искусственным обрывом 1 и 2-х проволок.

Блок-схема автономного устройства контроля накопления усталостных повреждений содержит опору 1, к которой подвешен провод 2 воздушной линии электропередачи. Контакты кольцевого типа 3, обхватывающие провод 2, соединены с согласующими устройствами 4. Согласующие устройства 4 соединены с измерителем сопротивления 5, который соединен с генератором импульсов 6, генератором высокой частоты 7, источником питания 8 и передающим устройством 9. Генератор импульсов 6 и генератор высокой частоты 7 соединены друг с другом, а также каждый из них соединен с источником питания 8, выполненным в виде автономного аккумулятора или вторичного источника, питающегося от воздушной линии электропередачи, с которым также соединено передающее устройство 9. Устройство контроля накопления усталостных повреждений может быть размещено на одной из опор наиболее нагруженного пролета контролируемого участка линии.

Способ осуществляется следующим образом.

Выбирают два участка провода 2 одинаковой длины, расположенные вблизи опоры 1 и на некотором расстоянии от нее. Расстояние может варьироваться. Например, в соответствии со сложившейся международной практикой накопление усталостных повреждений контролируется на расстоянии 89 мм от последней точки контакта провода с зажимом подвеса. Генератор импульсов 6 вырабатывает прямоугольные импульсы длительностью 5 с со скважностью 150. Эти импульсы запускают в работу высокочастотный генератор 7 частоты 2 МГц и измеритель сопротивления 5. Измеряют напряжения и токи в начале и в конце первого участка провода 2 и второго участка провода 2, после чего определяют сопротивление линии электропередачи на первом и втором участках провода 2. Измерение начинается после прохождения промежутка времени 2 с, в течение которого генератор 7 переходит в установившийся режим работы. Само измерение осуществляется в течение 2 с. Подсоединение к проводу 2 осуществляют при помощи контактов кольцевого типа 3, обхватывающих провод 2. Подсоединение устройств 4 к измерителю активного сопротивления 5 осуществляют при помощи фидеров и согласующих устройств 4. В измерителе сопротивления 5 осуществляют измерение активных сопротивлений и их сравнение между со-

бой. При превышении значения разности заданного уровня сигнал посылается на передающее устройство 9. Все блоки 5, 6, 7, 9 питаются от источника питания 8, выполненного в виде автономного аккумулятора или вторичного источника, питающегося от воздушной линии электропередачи. Измерение происходит с частотой 1-2 раза в сутки - в дневное и ночное время. Эту частоту можно варьировать установками в блоке 6.

Физическая сущность повышения чувствительности и точности определения уровня накопления усталостных повреждений заключается в следующем. В процессе зарождения трещин особенную роль играет поверхностный слой поликристаллического металла. В нем возникает множество дефектов кристаллического строения, таких как вакансии, дислокации, микропоры и их скопления. Объединяясь, они приводят к появлению микротрещин. Экспериментально наблюдаемая толщина поверхностного слоя составляет либо размер зерна, либо величину порядка десятков микрон. Толщина такого слоя в алюминии составляет величину около 30 мкм.

Поскольку зарождение трещин происходит на поверхности провода или вблизи нее в тонком слое, то необходимо измерять электрическое сопротивление именно этого слоя. Это можно сделать, если проводить такие измерения путем пропускания по проводу тока высокой частоты. Известно, что токи высокой частоты текут в приповерхностном слое проводника благодаря поверхностному эффекту. Толщину слоя можно варьировать, изменяя частоту тока. Электрическое сопротивление слоя чувствительно к наличию и концентрации дефектов кристаллического строения в нем. Такой способ контроля состояния провода еще более эффективен в том случае, когда в процессе эксплуатации происходит разрыв отдельных проводников в скрутке. Разрыв проводников происходит в зоне наибольших изгибных деформаций, т.е. на поверхности. В этом случае уменьшается площадь сечения проводящей трубки для высокочастотного тока.

Эффективная толщина проводящего поверхностного слоя определяется выражением

$$c = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}}$$

где  $\omega$  - циклическая частота,  $\mu$  - абсолютная магнитная проницаемость материала провода,  $\rho$  - его удельное сопротивление.

Величина электрического сопротивления поверхностного слоя в приближении  $c \ll D$  определяется выражением:

$$R = \frac{1}{\pi D} \sqrt{\frac{\rho\omega\mu}{2}}$$

где  $D$  - диаметр провода воздушной линии,  $l$  - длина участка, на котором измеряется сопротивление.

В случае обрыва  $m$  проводников толщины  $d$  в скрутке, расположенных на поверхности, проводимость всего провода уменьшается. В результате этого изменяется периметр сечения  $P$ . Он теперь состоит из сектора внешней окружности с радиусом всего исходного провода и сектора внутренней окружности с радиусом, уменьшенном на диаметр одной жилы. Если принять за  $n$  общее количество жил в поверхностном слое исходного провода, то полная длина дуг большой и малой окружностей равна

$$P = \pi D \left(1 - \frac{m}{n}\right) + \pi(D - 2d) \frac{m}{n} = \pi \left(D - \frac{dm}{n}\right)$$

Тогда поверхностное сопротивление такого провода принимает вид:

$$R = \frac{\beta l}{\pi \left(D - \frac{dm}{n}\right)} \sqrt{\frac{\rho\mu}{2}}$$

Геометрический коэффициент  $0 < \beta < 1$  учитывает неплотное прилегание оборванных жил к оставшейся части, их отгибание.

Результаты экспериментальных измерений сопротивлений в диапазоне частот от 20 Гц до 2 МГц, проведенных для целого провода марки АС95 длиной 1,2 м и для провода с искусственным обрывом 1 и 2-х проволок показали, что обрыв проволок ведет к видимому увеличению сопротивления (фиг. 2). Для измерения сопротивления использовался прецизионный измеритель LCR E4980A. Измерения проводились в последовательном режиме  $L_s$ - $R_s$  (индуктивность - сопротивление).

Наибольшие изменения заметны при высоких частотах ( $10^{-1}$  Ом против  $\leq 10^{-3}$  Ом на низких). Исследования показали наличие зависимости поверхностного сопротивления от степени развития усталостных повреждений, числа поврежденных проволок, что может использоваться для диагностики накопления усталостных повреждений, технического состояния проводов.

Измерение сопротивления проводят дифференциальным или мостовым методом. Предлагаемый способ позволяет сравнивать величину поверхностного активного сопротивления провода в зоне подвеса с сопротивлением провода, не подверженного усталостному нагружению, той же длины. Результат замера высокочастотного активного сопротивления наиболее уязвимого фрагмента провода, включающего места его подвеса, передается на диспетчерский пульт либо высокочастотной связью по тому же проводу, либо радиосигналом.

Таким образом, заявленный способ позволяет повысить точность определения уровня накопления

усталостных повреждений и обеспечить повышение надежности контроля технического состояния провода.

#### ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

Способ контроля накопления усталостных повреждений проводов воздушной линии электропередачи, включающий измерение напряжения и тока в первом местоположении на линии электропередачи, измерение напряжения и тока во втором местоположении на линии электропередачи, при этом измеренные напряжения и токи в первом и втором местоположениях синхронизированы по времени, определение сопротивления линии электропередачи между первым и вторым местоположениями, отличающийся тем, что на линии электропередачи выбирают первый участок провода в месте подвеса провода на опору и второй участок провода той же длины, что и первый, расположенный на удалении от места подвеса, измеряют напряжения и токи в первом и втором местоположениях первого и второго участков, принимая первое и второе местоположения первого участка соответственно в начале и конце первого участка, а первое и второе местоположение второго участка соответственно в начале и конце второго участка, определяют активное сопротивление первого и второго участков провода линии, уровень накопления усталостных повреждений материала провода определяют по изменению поверхностного активного сопротивления первого участка провода, причем это изменение определяют по разности поверхностных активных сопротивлений со вторым участком провода, при этом измеряют поверхностные активные сопротивления двух участков провода по мостовой схеме при пропускании импульса тока высокой частоты, причем измерения осуществляют периодически автономным устройством, устанавливаемым на опоре воздушной линии электропередачи наиболее нагруженного пролёта, результаты измерений передают диспетчеру.



Фиг. 1

