

## **О НЕОБХОДИМОСТИ И ВОЗМОЖНОСТИ РАСПОЗНАВАНИЯ ВИДА ОТЛОЖЕНИЙ ПРИ МОНИТОРИНГЕ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ**

Эксплуатируемые в настоящее время и предлагаемые разработчиками информационно-измерительные системы мониторинга гололедно-ветровых и температурных нагрузок на воздушные линии электропередачи (ВЛ) производят обнаружение и измерение так называемых статических гололедно-ветровых и температурных воздействий на провода (фазные провода и грозотросы), траверсы и опоры ВЛ и сравнивают их с соответствующими предельно допустимыми (пороговыми) значениями, выбираемыми исходя из механической прочности конструкций элементов ВЛ.

Как показывает опыт [1], случаи возникновения аварий на ВЛ нередко имеют место в условиях, когда измеренные статические нагрузки от отложений и ветра при температуре гололедообразования не превышают, а иногда и значительно ниже пороговых величин. В таких случаях предлагаемые системы мониторинга не способны предупредить аварии на ВЛ. Причиной аварий при этом являются не статические, а динамические воздействия – пляска проводов, при которой значение момента суммарной нагрузки на элементы опор ВЛ может превышать исходную статическую гололедно-ветровую нагрузку в 2-3 и более раз.

Следовательно, динамические воздействия пляски проводов в сравнении со статическими нагрузками на элементы ВЛ являются наиболее аварийно опасными, и требуют первоочередного учета при создании систем мониторинга воздушных линий электропередачи.

Анализ динамических воздействий пляски проводов на элементы ВЛ показывает, что условиями возникновения динамических колебаний проводов ВЛ является одновременное совпадение (сочетание) наличия ветра определенной скорости и определенного направления относительно оси визирования линии, наличия гребневидной формы отложений определенной массы и с определенным распределением этих отложений по длине ВЛ [2]. Таким образом, распознавание гребневидной формы отложений совместно с обнаружением вышеописанных условий возникновения динамических колебаний проводов позволяет заблаговременно предпринимать соответствующие меры по предупреждению пляски проводов и ее аварийного воздействия, т.е. проводить своевременную плавку отложений.

В чистом виде решить задачу распознавания формы отложений крайне сложно. Авторами предлагается определять форму отложений по их виду: гололедные, снеговые, изморозевые или их смеси. Следовательно, одной из важнейших задач мониторинга воздушных линий электропередачи является

задача дистанционного непрерывного в реальном масштабе времени распознавания всех возможных видов отложений на проводе воздушной линии электропередачи, решение которой также позволяет получать более полную информацию о текущих гололедно-ветровых нагрузках на ВЛ и динамике их изменения.

В практической деятельности линейных служб сетевых предприятий распознавание вида отложений на проводах ВЛ осуществляется визуальным способом. При визуальном контроле отложений на проводах, действующие нормативные документы рекомендуют для определения структуры отложений скалывать их с провода до плавки или определять вид отложений по упавшим с провода нерасплавленным остаткам отложений. Недостатками визуального способа с точки зрения мониторинга являются: во-первых, то, что он требует непосредственного присутствия наблюдателя у контролируемого пролета, во-вторых, он практически не реализуем в условиях плохой видимости.

Известны также теоретические разработки по инструментальному дистанционному параметрическому способу распознавания вида отложений на проводах, основанному на измерении разницы приращения затухания высокочастотных (ВЧ) непрерывных зондирующих сигналов при прохождении их в проводе воздушной линии электропередачи за счет разницы коэффициента поглощения поверхностного электромагнитного ВЧ-поля разными видами отложений [3]. Кроме того, известны устройства (датчики) для измерения плотности отложений на специальных поверхностях, размещенных рядом (на расстоянии обеспечивающим электробезопасность) с проводом воздушной линии электропередачи контролируемого промежуточного пролета [4]. Известны и способы прогнозирования вида отложений на проводе, основанные на решении многомерной задачи термодинамического обменного процесса, использующие в качестве исходной информации температуры провода и воздуха, давление воздуха, относительную влажность, направление и скорость ветра [5].

При реализации распознавания вида отложений на проводе по разнице приращения затухания непрерывных зондирующих ВЧ сигналов практически невозможно разделить влияние на величину затухания или увеличение объема отложений или изменения вида отложений на проводе, даже при использовании многочастотного зондирования ВЧ-сигналами и сложной корреляционно-фильтровой обработки сигналов. Использование устройств (датчиков) для измерения плотностей отложений на специальных поверхностях, размещаемых рядом с проводом, не позволяют получить достоверный результат, т.к. условия образования отложений на проводе существенно отличаются от условия образования отложений на измерительной поверхности, из-за протекания по проводу токов нагрузки и соответственно температурного нагрева провода. Для прогноза вида отложений на проводе требуется измерение в точке контроля большого количества синоптических параметров, что требует больших аппаратных затрат на измерение этих параметров и передачу такой информации.

Следует особо отметить, что до настоящего времени независимо от применяемых способов и устройств при распознавании вида отложений задача

распознавания гребневидной формы отложений, как одного из условий возникновения пляски проводов ВЛ, не ставилась.

Приведенные недостатки известных способов и устройств обуславливают нецелесообразность их применения для распознавания вида отложений при мониторинге воздушных линий электропередачи.

При исследованиях [6] установлено, что различные виды отложений имеют место при различных, свойственных только им условиях. Изморозь – имеет низкую плотностей (0,1-0,3 г/мм<sup>3</sup>), и как правило цилиндрическую форму, образуется при температуре -4°С и ниже. Отложения из мокрого снега, имеющие плотность 0,3-0,6 г/мм<sup>3</sup>, образуются при температуре от +2 до 0°С, имеют нецилиндрическую близкую к гребневидной форму. Изморозь и мокрый снег как правило имеют форму с аэродинамическими свойствами, не способствующими возникновению пляски, и нередко обсыпаются с проводов при возрастании ветрового потока и изгибах провода, что приводит к неравномерному распределению отложений по длине линии, препятствующему развитию колебаний. Гребневидные отложения образуются на проводах при температуре провода от 0°С до -3°С и состоят либо из смеси гололеда и мокрого снега с удельной плотностью 0,4-0,6 г/мм<sup>3</sup>, либо из плотного прозрачного или матового гололеда с удельной плотностью 0,7-0,9 г/мм<sup>3</sup>. Гололедные отложения с высокой удельной плотностью при прочих равных условиях имеют большую массу и, следовательно, оказывают на провода ВЛ большие статические нагрузки, при которых подъемной силы ветра недостаточно для развития динамических колебаний провода, и поэтому вероятность возникновения пляски проводов при отложениях в виде гололеда без смеси минимальна. Таким образом, следует считать, что наиболее вероятно возникновение пляски при гололедно-снеговых отложениях с удельной плотностью 0,4-0,6 г/мм<sup>3</sup>.

Из вышеописанного следует, что распознавание вида отложений можно производить косвенно по температуре окружающей среды и удельной плотности отложений, рассчитываемой по формуле:

$$\sigma = V' / W, \quad (1)$$

где  $V'$  - масса отложений, г;  $W$  - объем отложений, мм<sup>3</sup>. При этом масса отложений может быть измерена непосредственно на проводе, объем отложений рассчитывается исходя из разности между ветровой нагрузкой на провод с отложениями и ветровой нагрузкой на провод без отложений.

Авторами предлагается способ распознавания вида отложений на проводе промежуточного ВЛ [7], заключающийся в том, что на траверсе опоры рядом с проводом одновременно измеряют скорость и относительное направление ветра, а на самом проводе измеряют весовую нагрузку от отложений (массу отложений) и ветровую нагрузку на провод с отложениями, по скорости и относительному направлению ветра рассчитывают ветровую нагрузку на провод без отложений, по разнице между ветровой нагрузкой на провод с отложениями и ветровой нагрузкой на провод без отложений вычисляют объем отложений на проводе, по объему отложений и весовой нагрузке отложений по формуле 1 вычисляют удельную плотность отложений находящихся на проводе, которую вычитают из

известных удельных плотностей всех распознаваемых видов отложений на проводе и принимают решение о наличии на проводе отложений того вида, для которого разница минимальна.

Устройство распознавания вида отложений на проводе промежуточного пролета ВЛ, реализующее предлагаемый способ, и представленное на рис.1, содержит устройство телепередачи, две гирлянды изоляторов и два силоизмерительных датчика (ДТ), каждый из которых подвешен подвижно между траверсой опоры и соответствующей гирляндой изоляторов, нижние концы обеих гирлянд изоляторов соединены между собой шарнирно, образуя V-образную подвеску, к которой прикреплен провод, верхние концы датчиков крепятся к траверсе опоры на расстоянии друг от друга равном длине гирлянды изоляторов с датчиком, образуя с V-образной подвеской равносторонний треугольник, измеритель относительного направления ветра (ин), измеритель скорости ветра (ис), пять функциональных преобразователей (ФП), делитель (Делит), два формирователя порогов,  $m+1$  сумматоров (Сумм), два компаратора (Комп), логический элемент «И» и сравнивающее устройство (Срав).

В представленном устройстве одновременно и в согласованном взаимодействии работают 2 канала измерения: канал измерения фактической весовой нагрузки отложений на проводе и ветровой нагрузки на провод с отложениями с использованием V-образной подвески, и канал измерения ветровой нагрузки на провод без отложений с использованием индикаторов

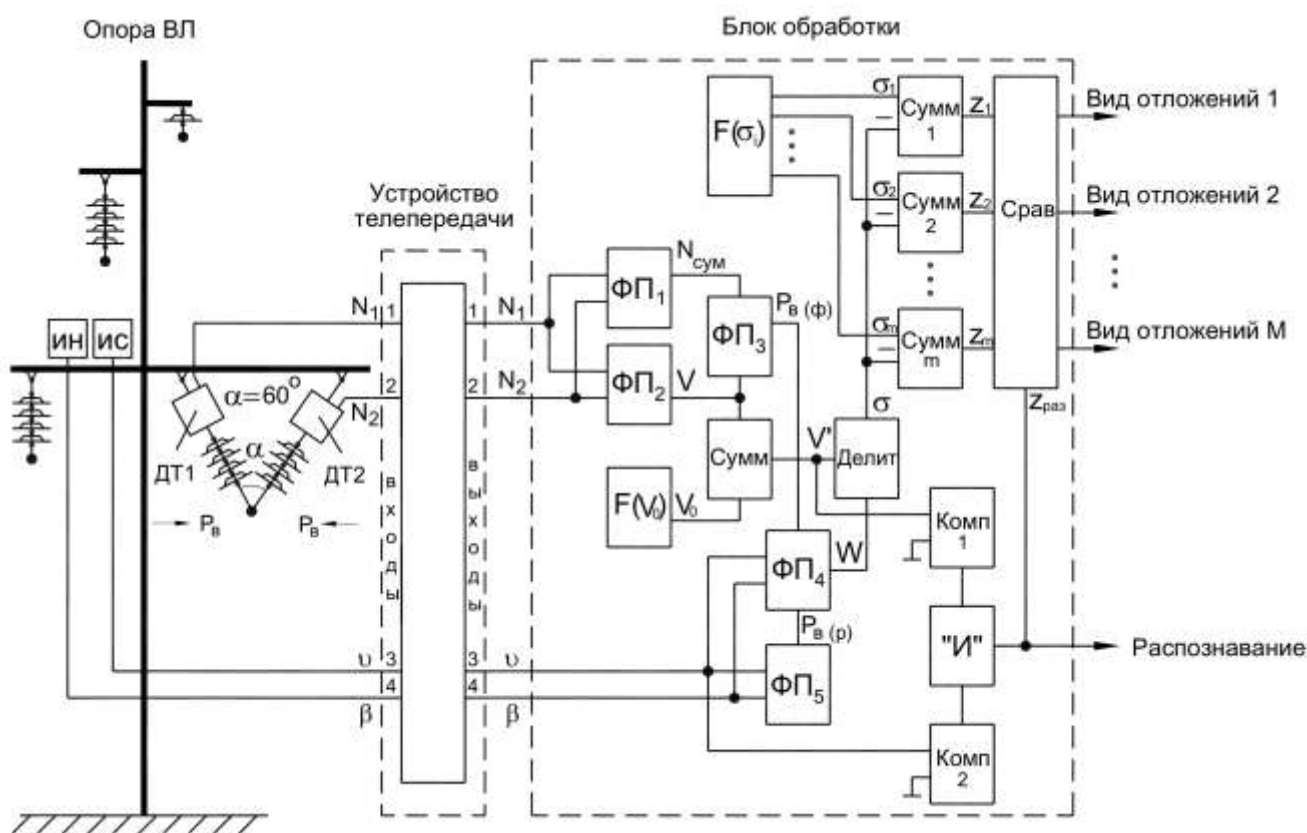


Рис.1. Устройство распознавания вида отложений

ин – измеритель направления ветра; ис – измеритель скорости ветра; ДТ1, ДТ2 – силоизмерительные датчики; ФП – функциональный преобразователь; Сумм – сумматор; Делит – делитель; Комп – компаратор; «И» - логический элемент; Срав –сравнивающее устройство.

направления и скорости ветра. На основе информации, полученной обоими каналами, рассчитывается вес и объем отложений на проводе промежуточного пролета, по которым рассчитывается удельный вес отложений на проводе промежуточного пролета. Полученное значение удельного веса отложений на проводе промежуточного пролета вычитается из известных удельных плотностей всех распознаваемых видов отложений на проводе и вырабатывается решение о наличии на проводе отложений того вида, для которого разница минимальна. Это решение выдается в виде сигнала «Вид отложений» при наличии сигнала разрешения – «Распознавание».

Рассмотрим подробнее работу устройства. Силовая нагрузка на провод промежуточного пролета, а, следовательно, и на V-образную подвеску в общем случае состоит из трех составляющих:  $V_0$  - нагрузка на провод от собственной массы,  $V'$  - нагрузка на провод от отложений, и  $P_{B(\phi)}$  - фактическая ветровая нагрузка на провод с отложениями. Действуют эти три составляющие независимо друг от друга, и  $V_0$  не может быть равной нулю. Учитывая последнее обстоятельство – то, что  $V_0 > 0$ , количество возможных вариантов сочетаний статических нагрузок на V-образную подвеску провода промежуточного пролета равно шести. Первый вариант – нет ни ветра ( $P_{B(\phi)} = 0$ ), ни отложений ( $V' = 0$ ); второй – есть отложения ( $V' > 0$ ), нет ветра ( $P_{B(\phi)} = 0$ ); третий - нет отложений ( $V' = 0$ ), ветер направлен слева направо ( $P_{B(\phi)} > 0$ ); четвертый - нет отложений ( $V' = 0$ ), ветер направлен справа налево ( $P_{B(\phi)} > 0$ ); пятый - есть отложения ( $V' > 0$ ), ветер направлен слева направо ( $P_{B(\phi)} > 0$ ); шестой - есть отложения ( $V' > 0$ ), ветер направлен справа налево ( $P_{B(\phi)} > 0$ ). Так как в соответствии с принципом работы устройства распознавание по удельному весу имеет смысл только при одновременном наличии отложений на проводе и ветровой нагрузки на него, то есть, из всех шести возможных вариантов силовой нагрузки на V-образную подвеску провода рассмотрим только два последних (с наличием отложений на проводе, и отличающихся друг от друга противоположным направлением ветра), представленные на рис.2.

Рассмотрим более подробно эти два варианта.

Первый вариант – есть отложения на проводе ( $V' > 0$ ) и есть ветер ( $P_{B(\phi)} > 0$ ), например, слева направо, как показано на рис.2а. В этом случае к  $V_0$  добавляется вес отложений на проводе  $V'$  и ветровая нагрузка  $P_{B(\phi)}$ , перпендикулярная гололедной, сигналы с датчиков ДТ1 и ДТ2 не равны между собой:  $N_1 > N_2$ . Нагрузка от провода с отложениями и суммарная нагрузка на датчиках определяются соответственно по формулам:

$$V = V_0 + V', \quad (2)$$

$$N_{\text{сум}} = \sqrt{(V_0 + V')^2 + P_{B(\phi)}^2}. \quad (3)$$

Во втором варианте – есть отложения на проводе  $V' > 0$  и есть ветер, справа

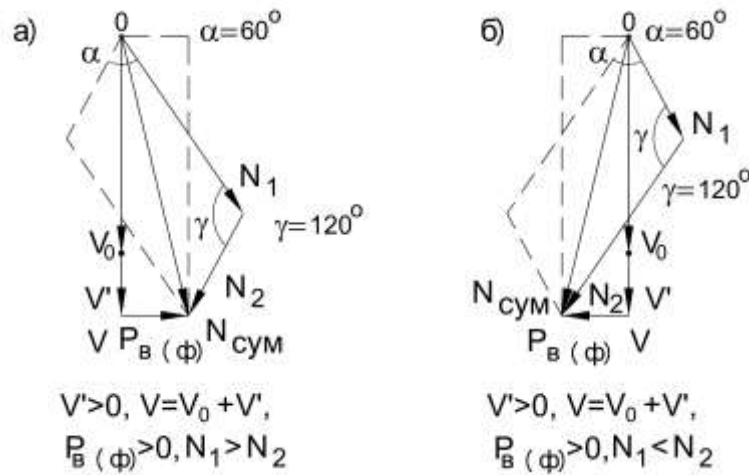


Рис.2. Варианты сочетаний гололедно-ветровых нагрузок на V-образную подвеску при направлении ветра слева направо (а) и справа налево (б)

налево  $P_{B(\phi)} > 0$ , как показано на рис.2б, векторная диаграмма представляет собой зеркальное отображение рис.2а, и на ней вектора  $N_1 < N_2$ .

При обоих вариантах нагрузок, сигналы датчиков  $N_1$  и  $N_2$  в виде напряжений или токов соответственно через отдельные первый и второй каналы устройства телепередачи поступают параллельно на соответствующие входы функциональных преобразователей. Первый функциональный преобразователь по входным сигналам  $N_1$  и  $N_2$  вычисляет величину гололедно-ветровой нагрузки  $N_{\text{сум}}$  по формуле:

$$N_{\text{сум}} = \sqrt{N_1^2 + N_2^2 - 2 \times N_1 \times N_2 \times \cos \gamma}. \quad (4)$$

В формуле угол  $\gamma = 180^\circ - \alpha$ , а угол  $\alpha$  - это угол между осями гирлянд изоляторов в месте их соединения и крепления к ним провода (при равностороннем треугольнике V-образной подвески  $\alpha = 60^\circ$  - оптимальный угол, а при равнобедренном  $\alpha \neq 60^\circ$ ). Второй функциональный преобразователь по входным сигналам  $N_1$  и  $N_2$  вычисляет величину  $V$  по формуле:

$$V = (N_1 + N_2) \times \sin[(180 - \alpha)/2]. \quad (5)$$

Сигнал гололедно-ветровой нагрузки  $N_{\text{сум}}$  с выхода первого функционального преобразователя поступает на первый вход третьего функционального преобразователя. Сигнал  $V = V' + V_0$  с выхода второго функционального преобразователя поступает на второй вход третьего функционального преобразователя и на первый вход сумматора, на второй вход которого поступает сигнал  $V_0$  с выхода первого формирователя порога. Сумматор формирует сигнал  $V'$  веса отложений на проводе промежуточного

пролета. Третий функциональный преобразователь вычисляет фактическую ветровую нагрузку на провод по формуле:

$$P_{B(\phi)} = \sqrt{N_{\text{сум}}^2 - V^2} . \quad (6)$$

Сигнал  $P_{B(\phi)}$  с выхода третьего функционального преобразователя поступает на третий вход четвертого функционального преобразователя. Одновременно с этим, под действием скоростного напора ветра измеритель скорости ветра и измеритель относительного направления ветра вырабатывают соответствующие сигналы  $\nu$  и  $\beta$ , которые через отдельные третий и четвертый каналы устройства телепередачи поступают соответственно на первый и второй входы четвертого и пятого функциональных преобразователей и, кроме того, сигнал  $\nu$  поступает на первый вход второго компаратора. Так как, отложения на проводе есть, т.е.  $V > 0$  и есть ветер  $\nu > 0$  (условия целесообразности распознавания отложений на проводе) первый и второй компараторы сформируют сигналы превышения нулевого потенциала, подключенного на их вторые входы. Сигнал превышения нулевого потенциала с первого и второго компараторов в виде логических «1» поступают соответственно и одновременно на первый и второй входы логического элемента «И», в результате чего на его выходе будет формироваться логическая «1» которая в виде сигнала «Распознавание» появится на  $m+1$ -ом выходе устройства распознавания отложений и в виде сигнала  $Z_{\text{раз}}$  поступит на разрешающий вход сравнивающего устройства, благодаря чему на его одном выходе появится логическая «1» в качестве сигнала вида отложений. Пятый функциональный преобразователь рассчитывает ветровую нагрузку на провод промежуточного пролета без отложений  $P_{B(p)}$  по формуле:

$$P_{B(p)} = \nu \times \sin^2 \beta \times K' \times L \times d, \quad (7)$$

где  $K' = \frac{\alpha_1 \times k_1 \times C_X}{1,6 \times F} \times 10^{-3}$  - коэффициент пропорциональности для провода с сечением  $F$ , диаметром  $d$ , длиной  $L$ , с коэффициентом лобового сопротивления скоростному напору ветра по пролету  $C_X$ , с коэффициентом влияния длины пролета  $k_1$ , коэффициентом неравномерности скоростного напора по пролету  $\alpha_1$ . Сигнал  $P_{B(p)}$  с выхода пятого функционального преобразователя поступает на четвертый вход четвертого функционального преобразователя. Четвертый функциональный преобразователь вычисляет объем отложений на проводе промежуточного пролета  $W$  по формуле:

$$W = \pi \times \left( \frac{d}{2} + b \right)^2 \times L, \quad (8)$$

где  $b = \frac{\Delta P_B}{2v \times \sin^2 \beta \times K'}$  - толщина стенки отложений на проводе промежуточного пролета,  $\Delta P_B = P_{B(\phi)} - P_{B(p)}$ . Сигнал объема отложений на проводе  $W$  с выхода четвертого функционального преобразователя поступает на второй вход делителя. С выхода первого сумматора сигнал  $V'$  поступает на первый вход делителя и на первый вход первого компаратора. Делитель формирует сигнал удельной плотности отложений на проводе промежуточного пролета  $\sigma = V'/W$ , который поступает одновременно на вторые входы второго, третьего, ...,  $m+1$ -ого сумматоров. На первые входы второго, третьего, ...,  $m+1$ -ого сумматоров поступают сигналы  $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_m$  априорно известных удельных плотностей всех распознаваемых видов отложений с соответствующих выходов второго формирователя порогов. В сумматорах формируются сигналы разности по модулю  $z_1 = |\sigma_1 - \sigma|$ ,  $z_2 = |\sigma_2 - \sigma|$ , ...,  $z_m = |\sigma_m - \sigma|$ , которые поступают на соответствующие входы сравнивающего устройства. Сравнивающее устройство сравнивает разностные сигналы  $z_1, z_2, \dots, z_m$  по величине между собой и определяет номер входа с наименьшим входным сигналом. При цифровой программной реализации всех записанных выше аналитических выражений процедура поразрядного сравнения цифровых кодов сигналов разности и выбор номера цифрового кода с минимальной величиной стандартна и не требует пояснения.

Если на проводах отложений нет ( $V' = 0$ ) или нет ветра ( $v = 0$ ), или одновременно нет отложений и нет ветра, то соответственно первый или второй компараторы или оба вместе сформируют логический «нуль», так как не превышен нулевой потенциал на вторых входах этих компараторов и логический элемент «И» сформирует логической «нуль», который как отказ распознавания отложений появится на  $m+1$  выходе устройства и как не разрешающий сигнал  $z_{раз}$  исключит прохождение логических «1» через все логические элементы «И» на всех выходах сравнивающего устройства.

Выводы:

1. Дистанционное в реальном масштабе времени распознавание всех возможных видов отложений (гололедных, снеговых, изморозевых и их смесей) на проводе ВЛ является одной из важнейших задач мониторинга воздушных линий электропередачи.

2. Распознавание гребневидной формы гололедных и гололедно-снеговых отложений совместно с обнаружением остальных условий возникновения динамических колебаний проводов (грозотросов) ВЛ позволяет заблаговременно принимать соответствующие меры по предупреждению пляски проводов и ее аварийного воздействия, т.е. своевременно проводить плавку отложений.

3. Распознавание всех возможных видов отложений дает возможность получать более полную информацию о текущих нагрузках на провода ВЛ и динамике их изменения.

4. Дистанционное непрерывное в реальном времени автоматическое распознавание всех видов отложений на проводе промежуточного пролета ВЛ



может быть технически реализовано с помощью представленного авторами устройства, реализующего разработанный способ распознавания вида отложений на проводах ВЛ.

Литература:

1. Байрамгулов Ю.Ж. Совершенствование сельских воздушных линий 6 – 10 кВ, подверженных динамическим нагрузкам: Дис. докт. техн. наук: 05.20.02 / Ю.Ж.Байрамгулов. Башкир. ордена труд. крас. знам. ун-т. – СПб., 1993. – 281с.
2. Кузнецов П.А. Анализ динамических воздействий пляски проводов и грозотросов на конструктивные элементы промежуточных пролетов воздушных линий электропередачи 110, 500 кВ / П.А. Кузнецов, С.В. Аверьянов, Г.Г. Угаров, В.Я. Башкевич // Электронный журнал "Новое в российской электроэнергетике". – 2006. – №2. – С.29-36.
3. Ишкин В.Х., Цитвер И.И. Высокочастотная связь по линиям электропередачи 330-750 кВ. – М.: Энергоиздат, 1981. – 208 с.
4. Патент на изобретение РФ № 2158995, МПК Н 02 G 7/16, 2000.
5. Матвеев Л.Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. – Л.: Гидрометиздат, 1976.
6. Кузнецов П.А. Влияние формы отложений на проводе воздушной линии электропередачи на его состояние в ветровом потоке / П.А. Кузнецов, В.Я. Башкевич // Проблемы электроэнергетики: Межвуз. науч. сб./ Саратов. гос. техн. ун-т. – Саратов: СГТУ, 2006. – С. 50-55.
7. Способ распознавания вида отложений на проводе промежуточного пролета воздушной линии электропередачи и устройство для его осуществления. Заявка на патент РФ на изобретение № 2005120435/17(023106) от 30.06.2005г. Башкевич В.Я.