



АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАЗРУШАЮЩИХ АТМОСФЕРНЫХ НАГРУЗОК НА ЭЛЕМЕНТЫ КОНСТРУКЦИЙ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

А. А. КОЗЛОВСКИЙ, А. Е. ОРЛОВИЧ, С. В. СЕРЕБРЕННИКОВ

Рассмотрены причины и механизмы разрушения элементов конструкций линий электропередач; установлено, что 85 % всех разрушений происходит при их сверхнормативном обледенении. Предложена система прогнозирования разрушающей гололедной нагрузки, основанная на периодическом принудительном охлаждении контролируемой поверхности и линейной экстраполяции результатов измерения времени работы микрохолодильника. Разработано устройство, позволяющее своевременно вводить в действие специализированные средства защиты.

Causes for and mechanisms of fracture of structural elements in electric-power transmission lines are considered; it is found that 85 % of all the fractures occur at their abnormal icing. Proposed is a system of forecasting the breaking icing load, based on a periodical forced cooling of the surface being controlled and linear extrapolation of the results of measurement of the microcooler operation time. A device is developed, permitting a timely commissioning of specialized protective means.

Воздушные линии электропередач (ВЛЭ) являются звеном энергосистемы, наиболее подверженным разрушающему влиянию атмосферных нагрузок – гололёда, ветра, температуры и т.п. Большинство ВЛЭ Украины находится в эксплуатации 20–30 лет и уже исчерпало свой ресурс в среднем на 70 %. Это объясняется тем, что продолжительное воздействие нагрузок даже расчётных значений приводит к возрастанию усталости металла, накоплению повреждений и развитию дефектов в элементах конструкций. Старением металла объясняются увеличение с течением времени провисания электропроводов вследствие постоянных растягивающих усилий и обрывы провода в местах крепления к опорам. При сверхнормативном провисании фазных электропроводов и раскачивании под воздействием ветра возникают их схлестывания и, как результат, пережоги и надломы в местах контактирования. В свою очередь, механическая прочность опор снижается коррозионным износом металла под влиянием минерализованной влаги и грунтовых солей. Агрессивная среда также разъедает бетон опоры, вследствие чего он теряет прочность и выкрашивается; в местах контакта с окисленной арматурой бетон набухает и образуются сквозные трещины. Дополнительные нагрузки вследствие атмосферных воздействий также приводят к накоплению остаточных деформаций и ускоряют износ конструкций. Анализ причин отказов ВЛЭ по элементам показывает, что 30... 35 % из них составляют повреждения опор, а в остальном – электропроводов и изоляторов, причем 85 % разрушений ВЛЭ происходит при сверхнормативном гололеде. Для учета экстремальных усилий, которые выдерживает конструкция под воздействием атмосферных факторов, в расчеты закладывается коэффициент запаса прочности 2,22... 2,86. Дальнейшее усиление механической прочности является проблематичным и нецелесообразным, поскольку всегда существует вероятность того, что возникнет такая гололедно-ветровая нагрузка, которая приведет к полному разрушению ВЛЭ.

Из приведённого следует, что линии электропередачи в процессе эксплуатации естественным образом постепенно теряют свои прочностные характеристики. Но поскольку этим процессом можно управлять, он не заканчивается разрушением ВЛЭ. Поэтому одной из основных задач технической эксплуатации линий является контроль за процессом изменения технических характеристик и диагностика состояния их элементов для принятия решений относительно проведения ремонтных работ по восстановлению характеристик или замене изношенных дефектных элементов новыми.

Во то же время, как показывает ежегодный опыт, к наиболее массовым повреждениям элементов конструкций ВЛЭ приводит неуправляемое вероятностное влияние атмосферных нагрузок, которые превышают расчётные в 3-4 раза. Например, гололед 28–30 ноября 2000 г. привел к обесточиванию в 11 областях Украины 3861 населенных пунктов вследствие повреждения 15800 ВЛЭ; лишь в Винницкой области было разрушено 95 %, а в Одесской – 90 % опор распределительных сетей. Общие убытки от этих разрушений составили 512 млн грн. Такие результаты обусловлены тем, что действие асимметричных атмосферных нагрузок, в отличие от нормативных, создаёт изгибающие усилия на опоры, интенсивно закручивающие и растягивающие провода, а также другие деформирующие влияния. Например, при одностороннем отложении льда механическая нагрузка вызывает закручивание провода вокруг своей оси на угол 180° и более, что приводит к надломам и истиранию провода. Обледенелый провод приобретает повышенную парусность и, соответственно, на него усиливается давление ветра: при углах направления последнего к ВЛЭ порядка 60... 90° эта нагрузка передаётся опорам и приводит к их разрушению. При обрыве обмёрзших проводов с одного стороны опоры резко возрастает изгибающая нагрузка с другой, в результате чего опора падает, асимметрия нагрузки переносится на соседнее звено ВЛЭ и т. д. – наблюдается эффект опрокидывания опор по принципу «домино». Таким образом, применение лишь неразрушающего контроля за состоянием ВЛЭ явно недостаточно. Для предотвращения разрушаю-



щих спонтанных атмосферных нагрузок, покольку для этого нужны надёжные системы прогнозирования времени их появления. Лишь наличие своевременного прогноза позволяет успешно подготовить и эффективно применить соответствующие средства защиты. В настоящее время существуют электростатический, тепловой, физико-химический и механический способы защиты элементов конструкций электросетей от обмерзания. Наиболее рациональным и доступным является электростатический способ, при котором к действующей сети переменного тока подключается напряжение постоянного тока. При этом сложное результирующее электрическое поле напряженностью $E = 10 \dots 15$ кВ/см образует вокруг электропроводов ионную «рубашку» [1]. В результате масса гололедных отложений уменьшается на 50... 80 %, а их плотность составляет 0,14... 0,20 г/см³ в отличие от обычной 0,86 г/см³ при $E = 5$ кВ/см. Эффективность такой защиты особенно высока на начальной стадии обмерзания. В случае, если масса гололеда на конструктивных элементах приближается к критическому значению, целесообразно применять экстренную его плавку искусственными токами короткого замыкания.

Таким образом, решение задачи предотвращения разрушающего гололедообразования состоит из двух этапов: 1) своевременной диагностики предгололедного состояния и прогноза времени до появления обмерзания элементов конструкций ВЛЭ; 2) применения активных методов предотвращения или устранения гололеда.

Для контроля за процессом образования гололедных отложений широко используются весовые датчики, которые ступенчато или плавно фиксируют гололедно-ветровые нагрузки. Сигнал от датчика поступает на диспетчерский пункт или же, при достижении критического значения, действует непосредственно на включение аппаратов защиты. Однако успешность этих мероприятий всецело зависит от скорости их проведения, т. е. от уменьшения суммарного времени: $\tau_{\text{п}} = \tau_{\text{реш}} + \tau_{\text{соб}} + \tau_{\text{пл}} + \tau_{\text{к}} + \tau_{\text{разб}}$, ч, где $\tau_{\text{реш}}$ – интервал времени от сигнала о начале гололедообразования до принятия решения относительно защиты ВЛЭ; $\tau_{\text{соб}}$ – продолжительность сборки и настройки схемы защиты; $\tau_{\text{пл}}$, $\tau_{\text{к}}$, $\tau_{\text{разб}}$ – соответственно время работы защитной аппаратуры, контроля эффективности защиты, разборки схемы и переподготовка ее для других присоединений подстанции.

Недостатком известных систем защиты является необходимость одновременно с диагностикой степени обмерзания проводить контроль за метеорологической ситуацией в районе электрических сетей. Опыт эксплуатации этих систем показал, что прогноз о возможности обмерзания носил весьма приближенный характер и был мало эффективен вследствие невозможности учета всей совокупности метеофакторов и, главное, – параметров непосредственно поверхности элементов ВЛЭ. Поэтому нами было предложено решение задачи заблаговременного (за 2-3 ч) прогнозирования начала обмерзания без применения длительных и трудоем-

ких метеоизмерений. При этом для нашего случая использована «малая динамическая модель прогноза гололеда» [2], из которой вытекает, что кристаллизация воды, т. е. образования гололеда и изморози, наблюдается в тех случаях, когда:

$$\Delta T = T_{\text{пр}} - T_{\text{л}} \leq 0. \quad (1)$$

Из этого следует, что провод ВЛЭ начнет обмерзать, если температура его поверхности $T_{\text{пр}}$ станет ниже, чем температура точки льда $T_{\text{л}}$, т. е. прогнозирование гололеда сводится к прогнозированию разности температур ΔT .

Основным недостатком приведенного метода является то, что он становится непригодным в случае гололедообразования при положительной температуре. В разработанной нами динамической модели прогнозирования диагностика момента обмерзания конструкций времени осуществляется на основе контроля τ_0 изменения состояния контролируемой поверхности при искусственном ее охлаждении. Предложенная модель базируется на следующем: при температуре воздуха, при которой возможно обмерзание ($-8 < T_{\text{п}} < 2$, °С) одновременно запускаются электронный секундомер и устройство, охлаждающее контролируемый участок провода с постоянной скоростью. Момент появления искусственных гололедных отложений регистрируется датчиком, в частности, оптическим, сигнал с которого останавливает секундомер, фиксируя время τ_0 работы охлаждающего устройства. В дальнейшем через определенные одинаковые промежутки времени Δt , достаточные для восстановления начального естественного состояния поверхности реального провода ВЛЭ ($\Delta t \gg \tau_0$), операция искусственного охлаждения повторяется. По мере приближения метеорологической ситуации к благоприятной для обмерзания время τ_{0i} будет уменьшаться, а в момент образования естественного гололеда $\tau_{0i} = 0$.

Время работы охлаждающего устройства, за которое появится гололед, может быть определено аналитически из уравнения теплового баланса для участка провода ВЛЭ:

$$P_x \tau_0 = dQ_{\text{к}} + dQ_{\text{кр}} - dQ_{\text{л}} - dQ_{\text{тл}} - Q_{\text{л}}, \quad (2)$$

где P_x – мощность микрохолодильника; τ_0 – время охлаждения; $dQ_{\text{к}}$ – потери тепловой энергии вследствие конвективного теплообмена между проводом и окружающей средой; $dQ_{\text{л}}$ – количество тепла, которое забирается водными каплями; $dQ_{\text{д}}$ – количество тепла, выделяемое в проводе вследствие протекания электрического тока; $dQ_{\text{тл}}$ – теплоемкость рассматриваемого участка провода; $Q_{\text{л}}$ – скрытая теплота, освобожденная в момент покрытия поверхности провода льдом:

$$Q_{\text{л}} = m_{\text{л}} L_{\text{л}} \Delta t, \quad (3)$$

где $m_{\text{л}}$ – скорость гололедообразования; $L_{\text{л}}$ – удельная теплота плавления льда; Δt – время срабатывания датчика льда.

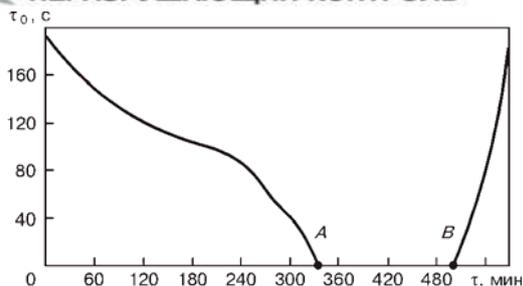


Рис. 1. Экспериментальная кривая изменения времени работы τ_0 охлаждающего устройства участка провода АС-50 ВЛЭ

Момент появления гололеда массой $M_{\text{л}}$ определяется выполнением условия, полученного из формул (2), (3):

$$M_{\text{л}} = \frac{dQ_{\text{к}} + dQ_{\text{кр}} + dQ_{\text{л}} + dQ_{\text{ты}} - P_{\text{х}} \tau_0}{L_{\text{л}}} > 0. \quad (4)$$

Изменяя по формуле (4) время τ_0 с определенным шагом, фиксируют его значение, при котором $M_{\text{л}} > 0$.

На рис. 1 приведена экспериментальная кривая изменения времени работы τ_0 охлаждающего устройства контролируемого участка провода АС-50 ВЛЭ напряжением 10 кВ от текущего времени τ при $T_{\text{п}} = 2^\circ\text{C}$. Характерная точка *A* отвечает началу процесса гололедообразования. Измерение времени τ_0 происходило с интервалом $\Delta\tau = 30$ мин. Видно, что значения τ_0 уменьшались при усилении Гололедной ситуации и в точке *A* ($\tau_1 = 334$ мин) началось естественное обмерзание проводов ($\tau_0 = 0$), которое длилось от τ_1 до $\tau_2 = 498$ мин, после чего наступило разрушение гололеда (значения τ_0 возрастают от точки *B*). Анализ кривых $\tau_0 = f(\tau)$ показывает, что за интервал времени до 2 ч участки кривых в зоне, предшествующей обмерзанию, с достаточной для практики точностью могут быть аппроксимированы линейной функцией. Тогда время начала образования ледяных отложений рассчитывается по формуле

$$\tau_{\text{пр}} = \frac{\Delta\tau}{\tau_{oi}/\tau_{oi} - \tau}$$

где τ_{oi-1} , τ_{oi} – время работы охлаждающего устройства, соответственно, на $i-1$ -м и i -м промежутках измерения, определяется из неравенства (4) либо экспериментально из рис.1.

На рис. 2 показана структурная схема устройства автоматического прогнозирования и диагностики момента обмерзания. При температуре воздуха, характерной для гололедообразования, блок датчикам температуры 5 подает управляющий сигнал на реле 6, которое подключает к блоку питания 9 секундомер 7 и охлаждающее устройство 1. Практически последнее реализуется на основе полупроводниковых термопар (пластин Пельтье), объеди-

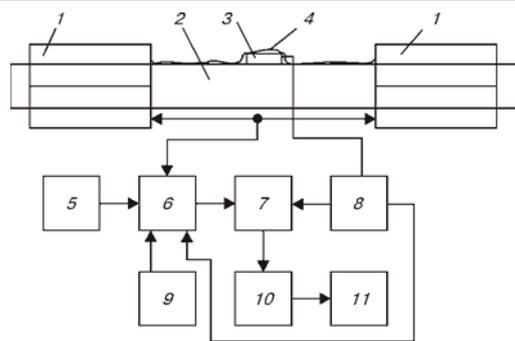


Рис. 2. Структурная схема устройства автоматического прогнозирования и диагностики момента обмерзания

ненных в термобатареи. На поверхности провода 2 расположен датчик 3 гололеда. При появлении искусственного гололеда 4 управляющий сигнал с датчика 3 подается на реле 8, которое отключает питание микроходильника 1 и останавливает отсчет времени секундомером 7. Значение времени заносится в память микроЭВМ. Далее через определенный промежуток времени при условии усиления гололедной ситуации процесс диагностики повторяется, а значение времени обмерзания корректируется и выводится на монитор 11. Устройства контроля (блоки 1–9) расположены на участках ВЛЭ с частотой 1 комплект на 20 км, а блоки 10, 11 – на центральном диспетчерском пункте. Информация о результатах опроса устройств контроля в энергосистеме передается диспетчеру с помощью высокочастотных телемеханических каналов связи [3]. Алгоритм обработки информации [4] обеспечивает расчет и при необходимости – текущую коррекцию времени гололедообразования, а также диагностику достижения нормального состояния ВЛЭ после проведения защитных мероприятий.

Таким образом, предложенная система прогнозирования времени гололедных нагрузок позволяет своевременно предотвращать или устранять их разрушающее воздействие.

1. Гончар М. И., Белаи И. П. Защита проводов ВЛ вот гололедоизморозевых отложений // Энергетика и электрификация. – 1995. – № 4. – С. 26–28.
2. Колмогорова И. М., Цыбикдоржиев М. Ц., Винаров А. З. Разработка малой динамической модели прогноза гололеда // рациональное проектирование и эксплуатация устройств сельского электроснабжения: Сб. науч. тр. – МИИСП, 1989. – С. 55-59.
3. Котиш І. А., Орлович А. Ю., Серебреніков С. В. Автоматизована система контролю за станом ізоляції в повітряних мережах напругою 10–35 кВ // Техн. діагностика і неконтроль. – 2000. – № 4. – С. 62-64.
4. Пристрої для діагностики обмерзання електродротів повітряних ліній / О. А. Козловський, А. Ю. Орлович, С. В. Серебреніков, П. Г. Плешков // Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів: Зб. наук. праць. – Київ; Львів. – 2002. – Вип. 7.