

УДК 621.315

**МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ НА  
ОСНОВЕ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ**

*Горохов Е.В., Гримуд Г.И., Турбин С.В.*

**ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время на Украине остро стоит задача обеспечения определенного уровня надежности строительных конструкций воздушных линий (ВЛ) электропередачи. Связано это, прежде всего с недостатком финансовых средств, выделяемых на строительство новых линий, взамен отслуживших свой век. Проблема оценки надежности существующих линий также достаточно актуальна из-за того, что строительство ВЛ осуществлялось в соответствии с нормами бывшего СССР, которые в настоящее время не соответствуют применяемым на Украине.

**СОСТОЯНИЕ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НА УКРАИНЕ**

В настоящее время на Украине эксплуатируются около 948 000 км ВЛ, 142 160 км из них напряжением 35-800 кВ (см. табл. 1). Причем эти данные остаются практически постоянными в течение последних 10 лет. Срок эксплуатации большинства ВЛ напряжением 110-220 кВ составляет в среднем 40-60 лет, а для некоторых объектов до 80 лет, из-за чего анализ аварийности данных конструкций представляет значительный интерес.

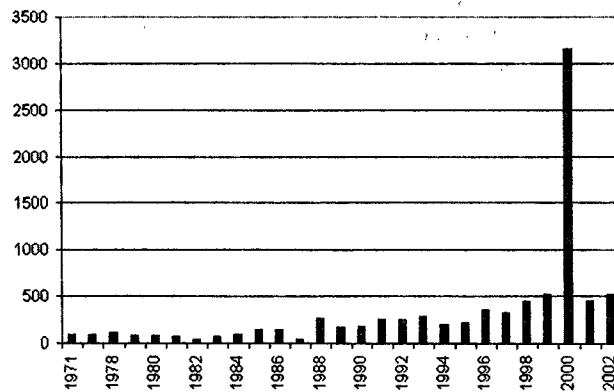
Таблица 1

Протяженность ВЛ в Украине

Напряжение ВЛ	Протяженность, тыс. км	Протяженность %	Количество опор	Количество опор, разрушенных в ноябре 2000 года	В % к общему количеству опор, подвергшихся воздействию гололеда
1	2	3	4	5	6
0,3-0,5	472,65	49,86	11816250	187000	4,24
2-30	333,2	35,15	6664000	138000	5,55
35	70,78	7,47	615478	1583	0,69
110	39,15	4,13	166596	986	1,59
154	10,33	1,09	40669	-	-
220	4,14	0,44	14892	2	0,04
330	12,94	1,36	44621	168	1,01

Продолжение таблицы 1.					
1	2	3	4	5	6
500-400	0,64	0,07	2065	1	0,13
750	4,08	0,43	12750	69	0,50
800	0,1	0,01	250	-	-
Всего	948,01	100	19377571	327809	4,53

Суммарное количество отказов конструкций опор, проводов и соединительной арматуры по годам, для ВЛ напряжением 35-800 кВ представлено на рис. 1. К сожалению после 1992 года централизованная система сбора данных по отказам ВЛ была уничтожена, и данные с 1992 по 2002 год несколько занижены, т.к. некоторые аварийные ситуации не зафиксированы.



**Рис. 1. Суммарное количество отказов конструкций опор, проводов и соединительной арматуры по годам, для ВЛ напряжением 35-800 кВ**

Анализ полученных данных показывает существенный рост числа отказов элементов ВЛ, что свидетельствует об изношенности фонда. Значительное количество отказов в 2000 году связано с широкомасштабной гололедной аварией. Наибольшая природная катастрофа, которая постигла Украину за последнее столетие, парализовала жизнедеятельность почти пяти тысяч населенных пунктов 12 областей Украины. В ноябре месяце 2000 г. в течение недели почти четыре млн. людей оказались в экстремальных условиях, оставшись без света и тепла, газо- и водоснабжения. Обледенение привело к аварии 20931 линии электропередачи, было разрушено более 300 тыс. железобетонных и около 20 000 металлических опор ВЛ. Общий ущерб, нанесенный Украине стихией, составил 655 млн. грн [1].

Высокая аварийность железобетонных опор объясняется достаточно большим процентным содержанием, т.е. до 70 % ВЛ напряжением 35-110 кВ выполнено на железобетонных опорах. Однако аварийность железобетонных опор при действии сверхрасчетных нагрузок, в пересчете на 100 км ВЛ в 7 раз выше, чем аварийность

металлических опор. В зависимости от причины аварийности отказы систематизированы на рис. 2.

Проведенные в [2] расчеты позволяют сделать выводы о необходимости совершенствования методик определения гололедно-ветровых нагрузок и методов предотвращения аварий, в частности путем плавки гололеда. Вторым аспектом является совершенствование методик оценки действительного состояния конструкций с учетом различных повреждений, таких как коррозионные и механические повреждения, осадки фундаментов и т.д.

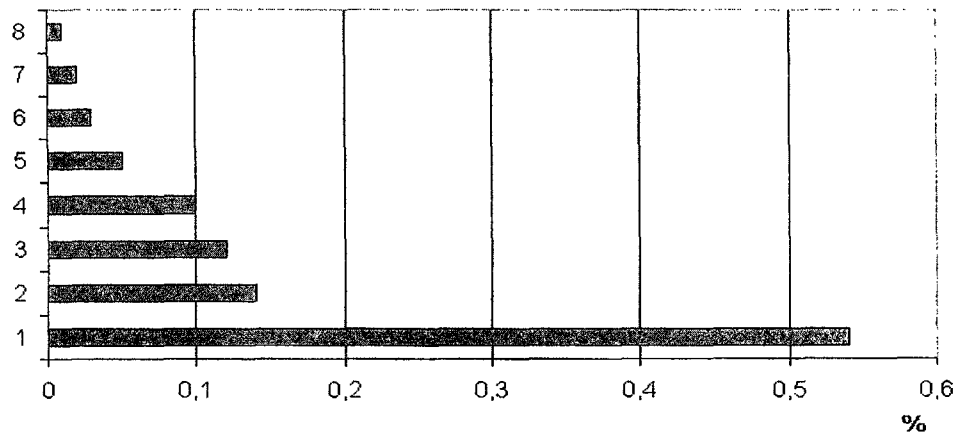


Рис. 2. Распределение количества отказов в зависимости от причины

Условные обозначения к рисунку 2:

1. Масштабные гололедно-ветровые воздействия; 2. Локальные гололедно-ветровые воздействия; 3. Не установленные причины; 4. Эксплуатационные недостатки; 5. Ошибки монтажа; 6. Ненадлежащее качество материалов; 7. Дефекты изготовления; 8. Ошибки проектирования.

#### МЕТОДОЛОГИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТЬЮ ВЛ

При мероприятиях по определению остаточного ресурса опор ВЛ необходимо не только учитывать их техническое состояние но и учитывать изменение нагрузок.

Из-за значительной протяженности ВЛ возможна существенная вариация климатических нагрузок по профилю трассы, что не лучшим образом влияет на требования безопасности и экономичности, а также повреждения различного рода, типа коррозионных повреждений, пробоев изоляторов и т.д. не могут быть своевременно обнаружены, что также приводит к снижению надежности.

Для решения данной проблемы была разработана методология создания единой геоинформационной системы содержащей систему управления базами данных, структура которой приведена ниже.

База данных «OLIS» содержит следующие блоки:

1. Блок содержащий данные о применяемых на ВЛ конструкциях (опоры, провода, тросы, изоляторы, система защиты от вибрации);
2. Блок учета несовершенств. Применительно к каждой конструкции содержатся данные об обнаруженных дефектах и повреждениях, сроках их устранения, действительных характеристиках материалов из которых конструкции выполнены;
3. Блок, содержащий техническую информацию, в т.ч. чертежи, сертификаты и т.д. (в настоящее время большинство информации представлено в бумажном варианте, что в некоторых случаях значительно замедляет работу системы);
4. Система сбора и учета информации об авариях и отключениях ВЛ;
5. Система сбора и обработки метеоданных, состоящая из данных метеостанций Госгидромета и специализированных метеопостов;
6. Система анализа данных.

Одним из основных достоинств данной системы является оперативность сбора и работы с информацией, распределенной на больших территориях, что особенно важно при аварийных ситуациях. Так информация с метеопостов может использоваться для оперативного реагирования и перевода линий в режим плавки гололеда.

#### КЛИМАТИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ И ВОЗДЕЙСТВИЯ

Для определения климатических нагрузок на элементы ВЛ был предложен подход, основанный на использовании полученных в [3] значений климатических параметров. Исходными данными для построения трехмерных электронных карт климатических воздействий служили географические координаты, значения климатических параметров метеорологических станций и их координаты: широта  $\phi$  и долгота  $\lambda$ .

Данные метеостанций по скорости ветра, ветровому давлению при гололеде и массе гололедных отложений аппроксимировалось функцией 1-го предельного распределения Гумбеля и собственно были получены исходные данные для районирования территории Украины, которые затем обрабатывались с учетом предложенной методики.

В процессе обработки метеоданных были выявлены погрешности, связанные с существующей системой сбора и обработки информации, это и влияние так называемого «человеческого» фактора, при измерениях параметров, и влияние места расположения измерительных приборов и т.д.

Для нивелирования подобного рода выбросов была применена методика сглаживания [4], согласно которой математическое ожидание случайного поля исследуемого параметра для любой точки местности определяется путем сглаживания ординат по формуле:

$$M = \frac{\sum_{i=1}^N Q_i c_i P_i}{\sum_{i=1}^N c_i P_i}, \quad (1)$$

где  $N$  – количество метеостанций;  
 $Q_i$  – ордината поля, равная значению исследуемого параметра для  $i$ -той метеостанции;  
 $c_i$  – весовая функция сглаживания;  
 $p_i$  – весовая функция точности, которую в большинстве случаев можно принять как:

$$p_i = \sqrt{n_i}, \quad (2)$$

где  $n_i$  – объем выборки данных для  $i$ -той метеостанции.

Весовая функция сглаживания определяется по формуле:

$$c_i = \exp\left(\frac{-d_i}{a}\right), \quad (3)$$

где  $a$  – константа определяющая меру сглаживания;

$d_i$  – расстояние от точки для которой вычисляется математическое ожидание до  $i$ -той метеостанции.

Построение электронных карт выполнялось при помощи программы Surfer.

Следующим этапом было нанесение на электронную карту трасс воздушных линий. В данном случае конкретная воздушная линия разбивалась на прямолинейные участки, привязка которых к карте осуществлялась по специализированным данным, предоставленным эксплуатирующими организациями а также по результатам измерений при помощи систем глобального позиционирования (global positioning systems).

Далее проекция ВЛ накладывалась на различные трехмерные климатические карты и выполнялось построение продольного профиля нагрузки. На основании проведенных исследований подготовлен электронный атлас климатических нагрузок на воздушные линии электропередачи напряжением 220 – 750 кВ, проходящих по территории Донецкой области.

Для учета влияния орографических условий местности используется методика, реализованная в [5], и автоматизированная согласно [6].

#### ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ. СИСТЕМА АНАЛИЗА ДАННЫХ

Для получения данных о надежности ВЛ необходимо иметь данные о фактических нагрузках и повреждениях ее элементов. В процессе обследования фиксируются следующие параметры: для определения нагрузок – стрелы провесов проводов, габариты до земли, расстояния между опорами и крены опор; для получения фактического состояния конструкции – данные о фактической прочности элементов, данные о дефектах и повреждениях.

На основании анализа натуральных освидетельствований более 4,5 тыс. км воздушных линий было предложено определять рекомендуемую периодичность обследований как:

$$T_{\theta} = T_{н.с.} \cdot K_{аз} \cdot K_{оп} \cdot K_{т}, \quad (4)$$

где,  $K_{аз}$  – коэффициент, принимаемый от 0,5 до 1 в зависимости от агрессивности атмосферы в зоне прохождения ВЛ;

$K_{op}$  – коэффициент, принимаемый от 0,8 до 1 в зависимости от орографических особенностей местности в месте прохождения ВЛ;

$K_m$  – коэффициент, зависящий от конструктивного исполнения опор, установленных на линии, который для металлических оцинкованных опор равен 1,25, металлических неоцинкованных опор – 1, для железобетонных – 0,9;

$T_{н.с.}$  – срок до первого планового обследования ВЛ, установленного в зависимости от надежности данного класса ВЛ и степени экологической опасности, равный от 15 лет для ВЛ напряжением 35-110 кВ до 20 лет для ВЛ 500 кВ.

Данная периодичность обследований устанавливается для участков ВЛ, т.е. на одной линии могут быть участки с различными сроками проведения обследований, границы которых устанавливаются в соответствии с принципами зонирования ВЛ согласно [6].

Для получения данных о надежности элементов ВЛ используются расчетные программы, так, например, для расчета опор применяются программные комплексы СКАД и ЛИРА основанные на использовании метода конечных элементов, которые дают результаты достаточно близкие к результатам программы Tower компании Power Line Systems ([www.powline.com](http://www.powline.com)) однако имеют не приспособленный для расчетов решетчатых башен интерфейс. На данном этапе производится учет влияния различных дефектов и повреждений, причем, учитываются, как правило, повреждения, ликвидация которых сравнима с заменой конструкции на новую, например, сплошная коррозия уголков стальной опоры ВЛ.

Сравнение полученных усилий в элементах опор от действия внешней нагрузки с расчетными напряжениями выполняется обычно с использованием метода частных коэффициентов надежности. Однако в последнее время разработана методика определения вероятности превышения нагрузки, которую исследуемая конструкция может выдержать. В основу метода положен следующий алгоритм.

Для всех элементов опоры ВЛ, кроме второстепенных, справедливо выражение:

$$\sigma_{lim} \leq R_y, \quad (5)$$

В случае рассмотрения (для примера) только ветровой нагрузки (5) запишется как:

$$\sigma_{lim} = \sigma_{dl}^c + \sigma_{dl}^t + \sigma_w^c + \sigma_w^t, \quad (6)$$

тогда

$$\sigma_{dl}^c + \sigma_{dl}^t + \sigma_w^c + \sigma_w^t \leq R_y, \quad (7)$$

где  $\sigma_{lim}$  – суммарное предельное напряжение в элементе от  $V_{lim}$  либо  $w_{lim}$  соответственно предельной скорости ветра либо ветрового давления на высоте 10 м с учетом влияния микроклиматических особенностей местности [5];

$\sigma_{dl}^c$ ,  $\sigma_{dl}^t$  – соответственно напряжения в элементе от собственного веса проводов, тросов и опоры;

$\sigma_w^c$ ,  $\sigma_w^t$  – соответственно напряжения в элементе от ветрового давления на провода, трос и конструкцию опоры, с учетом коэффициента динамичности  $C_d$ ;

$R_y$  – расчетное сопротивление материала опоры с учетом результатов фактических замеров.

Предполагая, что материал конструкций работает в упругой стадии, при помощи расчета исследуемой опоры используя метод конечных элементов, определяем следующие зависимости для каждого из выбранных элементов:

$$\sigma_{wi}^c = w_{lim} \cdot a_{wi}^c, \quad \sigma_{wi}^t = w_{lim} \cdot a_{wi}^t, \quad (8)$$

где  $a_{wi}^c$  и  $a_{wi}^t$  – весовые коэффициенты, полученные при расчете опоры на единичные нагрузки от ветрового давления на провода, тросы и опору соответственно.

Т.к. в общем случае для элементов решетки и поясов

$$\sigma_{ij} = \frac{N_{ij}}{\varphi_i \cdot A_i \gamma_c}, \quad \text{а } \sum_{j=1}^2 \sigma_{d_i}^j = b_i, \quad \text{то из (7) выразим } w_{lim}: \\ w_{lim} = \frac{R_{yi} \cdot \varphi_i \cdot A_i \gamma_c + b_i}{a_{wi}^c + a_{wi}^t}, \quad (9)$$

где

$N_{ij}$  – усилие в  $i$ -том элементе от  $j$ -той нагрузки;

$\varphi_i$  – коэффициент продольного изгиба элемента;

$A_i$  – площадь  $i$ -того элемента.

Тогда из (9) учитывая что

$$V_{lim} = \sqrt{\frac{w_{lim}}{0.61}}. \quad (10)$$

$$T = c \cdot \exp(d \cdot V_{lim}) \quad (11)$$

$$P(T) = \left(1 - \frac{1}{2T}\right)^{t_c} \quad (12)$$

где  $t_c$  – срок службы конструкции;

$c$  и  $d$  – параметры случайного процесса на данной метеостанции.

выразим  $P_i(T)$ :

$$P_i(T) = \left(1 - \frac{1}{2 \cdot c \cdot \exp\left(d \cdot \sqrt{\frac{R_{yi} \cdot \varphi_i \cdot A_i \cdot \gamma_c + b_i}{0.61 \cdot (a_{wi}^c + c_d \cdot a_{wi}^t)}}\right)}\right)^{t_c} \quad (13)$$

Дефекты, повреждения и отклонения конструкции от проектного положения вводятся в расчет либо снижением площади  $A_i$ , либо корректировками  $\varphi_i$  и  $R_y$ , либо изменением действительной геометрической схемы сооружения, что приведет в (13) к изменению коэффициентов  $a_{wi}^c$  и  $a_{wi}^t$ .

Вероятность безотказной работы всей конструкции  $P$  определяется как произведение вероятностей безотказной работы отдельных элементов соединенных последовательно. В данном случае общая вероятность получена путем произведения вероятности безотказной работы основных элементов опоры ВЛ (пояса и раскосы ствола и траверс) удаление которых из расчетной схемы ведет к лавинообразному разрушению конструкции. Данное допущение согласно исследованиям [6] несколько снижает расчетную надежность системы, однако в нашем случае вполне правомерно, т.к. исследуется в основном общий коррозионный износ конструкции, т.е. всех элементов, тогда  $P$  равно:

$$P = \prod_{i=1}^n P_i(T) \quad (14)$$

В зависимости от полученного значения, напряжения и класса надежности элементы ВЛ относят к следующим категориям состояния:

нормальное (1) – состояние конструкции, отвечающее требованиям нормативных документов;

удовлетворительное (2) – присутствуют отдельные дефекты и повреждения которые непосредственно не влияют на надежность конструкции в определенный момент времени;

непригодное к нормальной эксплуатации (3) – состояние конструкции, при котором присутствуют отдельные дефекты и повреждения которые непосредственно влияют на надежность конструкции в определенный момент времени, однако возможно и экономически целесообразно производить ремонт конструкции;

аварийное (4) – состояние конструкции, при котором на основе проверочных расчетов и анализа дефектов и повреждений невозможно гарантировать целостность конструкций на период усиления, либо усиливать конструкцию экономически нецелесообразно.

Путем проведенных технико-экономических расчетов с учетом состояния строительных конструкций электрических сетей на Украине предложено следующее ранжирование категории состояния конструкции в зависимости от вероятности превышения предельно допустимых нагрузок на металлические конструкции опор ВЛ (табл. 2).

Таблица 2

Классификация категорий состояния ВЛ в зависимости от напряжения и степени ответственности

Напряжение ВЛ	Категории состояния			
	1	2	3	4
400-750	$P \geq 0,95$	$0,9394 \leq P \leq 0,95$	$0,87 \leq P \leq 0,9394$	$P \leq 0,87$
220-330	$P \geq 0,85$	$0,812 \leq P \leq 0,85$	$0,629 \leq P \leq 0,812$	$P \leq 0,629$
35-110	$P \geq 0,61$	$0,534 \leq P \leq 0,61$	$0,123 \leq P \leq 0,534$	$P \leq 0,123$

Так конструкции, принадлежащие к 1-й категории состояния, имеют достаточную надежность и не нуждаются в ремонте. Конструкции 2-й категории



нуждаются в ремонте для повышения показателей долговечности. Конструкции 3-й категории нуждаются в проведении мероприятий по капитальному ремонту и повышению надежности ВЛ в целом, таких как: усиление отдельных элементов, постановка дополнительных элементов (изменение расчетной схемы сооружения), резервирование линии, перевод на более низкое напряжение, установка элементов защиты: сбрасывающих зажимов, тарировочных скоб [7] либо демпфирующих узлов [8], которые вводятся в подвесные гирлянды изоляторов и при аварийной нагрузке препятствуют развитию каскадной аварии. Для конструкций 4-й категории состояния мероприятия аналогичны приведенным для 3-й группы, однако решение о дальнейшей эксплуатации данной линии должно быть обосновано экономически.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная методика наряду с положениями, которые реализованы, еще содержит положения, которые необходимо доработать. В настоящее время на территории Донецкой области предложенная система начинает функционировать, причем отдельные блоки, такие как, сбора и обработки климатических нагрузок, блок учета несовершенств, блок содержащий технические данные об эксплуатируемых конструкциях и система анализа данных функционируют в течение 3-5 лет. Это позволило существенно повысить качество эксплуатации воздушных линий, своевременно выявить и устранить значительное количество несовершенств, прогнозировать места возникновения аварий в случае климатических перегрузок, т.е. значительно повысить надежность ВЛ.

### Литература

1. Масові пошкодження в електричних мережах України, що сталися наприкінці листопада та початку грудня 2000р. / Висновки комісії щодо механічної стійкості пошкоджених електричних мереж України. Пропозиції з підвищення рівня їх надійності. Міністерство палива та енергетики. Київ, 2000. 9 с.
2. Никифоров Е.П. Прогнозирование надежности ВЛ при воздействии сверхрасчетных гололедных нагрузок // Энергетическое строительство, 1990. №8. С. 35 – 37.
3. Нарожный В.Б., Княжевська С.Я., Глей Л.В. Кліматичні навантаження на повітряні лінії електромереж. К.: Енергопрогрес, 1994. 212 с.
4. Пашинський В.А. Атмосферні навантаження на будівельні конструкції для території України. К.: УкрНДПСК, 1999. 185 с.
5. A new Norwegian wind loading standard. Draft NS 3491-4 // 1st International Codification workshop for wind loads. Bochum (Germany), 2000. 7 p.
6. Горохов Е.В., Сапронов Ю.В., Турбин С.В., Нарожный В.Б. Методика определения климатических нагрузок на протяженные объекты // Вестник ДонГАСА. Макеевка, 2001 г. № 2001-4 (29). С. 29–36.
7. Перельмутер А.В. Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций. 2-е изд., перераб. и доп. Киев: Изд-во УкрНИИпроектстальконструкция, 2000. 216 с.
8. Horokhov Ye.V., Turbin S.V., Bakayev S.N., Nekrasov Yu.P., Bus'ko M.V. Damping Device for Power Transmission Lines // Proceedings of 10 IWAIS. Brno. 2002. Session 9. № 4. (In CD-ROM).

Статья поступила в редакцию 20 апреля 2003 г.