



ISSN 1819-432X print / ISSN 1993-3495 online

СУЧАСНЕ ПРОМИСЛОВЕ ТА ЦИВІЛЬНЕ БУДІВНИЦТВО
СОВРЕМЕННОЕ ПРОМЫШЛЕННОЕ И ГРАЖДАНСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО
MODERN INDUSTRIAL AND CIVIL CONSTRUCTION

2012, ТОМ 8, НОМЕР 2, 87–97

УДК 621.315

АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙНИХ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПРИ ВИЗНАЧЕННІ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ

Н. С. Смирнова

*Донбаська національна академія будівництва і архітектури,
вул. Державіна, 2, м. Макіївка, Донецька область, Україна, 86123.
E-mail: natashaligina@mail.ru*

Отримана 30 березня 2012; прийнята 25 травня 2012.

Анотація. У статті розглянута проблема залишкового ресурсу повітряних ліній електропередавання (ПЛ), наведені найбільш ймовірні причини виникнення відмов роботи, фактори розподілу цих причин, дефекти металевих опор, що найбільш часто зустрічаються. Розглянуто конструктивні і експлуатаційні особливості об'єкта дослідження. Проаналізовано ряд методик по визначенню надійності роботи конструкцій, вказані недоліки. Визначено черговість проведення заходів щодо підвищення надійності ПЛ. Сформульовано висновки щодо перспективних напрямків розвитку і розробки інженерних методик аналізу аварійності, алгоритмів розрахунку показників надійності в електричній мережі, а також вдосконалення нормативної бази щодо забезпечення безпеки конструкцій, що експлуатуються.

Ключові слова: повітряні лінії електропередавання (ПЛ), металеві конструкції, дефекти, залишковий ресурс, надійність.

АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНЫХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Н. С. Смирнова

*Донбасская национальная академия строительства и архитектуры,
ул. Державина, 2, г. Макеевка, Донецкая область, Украина, 86123.
E-mail: natashaligina@mail.ru*

Получена 30 марта 2012; принята 25 мая 2012.

Аннотация. В статье рассмотрена проблема остаточного ресурса воздушных линий электропередачи (ВЛ), приведены наиболее вероятные причины возникновения отказов работы, факторы распределения этих причин, наиболее часто встречающиеся дефекты металлических опор. Рассмотрены конструктивные и эксплуатационные особенности объекта исследования. Проанализирован ряд методик по определению надежности работы конструкций, указаны недостатки. Определена очередность проведения мероприятий по повышению надежности ВЛ. Сформулированы выводы относительно перспективных направлений развития и разработки инженерных методик анализа аварийности, алгоритмов расчета показателей надежности в электрической сети, а также совершенствования нормативной базы по обеспечению безопасности эксплуатируемых конструкций.

Ключевые слова: воздушные линии электропередачи, металлические конструкции, дефекты, остаточный ресурс, надежность.

ANALYSIS OF THE STRUCTURAL AND OPERATING FEATURES AT DETERMINATION OF REMAINING RESOURCE OF OVERHEAD LINES

Smirnova Nataliya

*Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture,
2, Derzhavina Str., Makiivka, Donetsk Region, Ukraine, 86123.*

E-mail: natashaligina@mail.ru

Received 30 March 2012; accepted 25 May 2012.

Abstract. The problem of remaining resource of overhead lines (OHL), is considered in the article. The most credible reasons of origin of refuses of work, factors of distributing of these reasons, most often meetings defects of metallic supports, are resulted. The structural and operating features of research object are considered. The row of methods is analysed on determination of reliability of work of constructions, failings are indicated. The order of leadthrough of measures is certain on the increase of reliability of OHL. Conclusions are formulated in relation to perspective directions of development and development of engineering methods of analysis of accident rate, algorithms of calculation of reliability indexes in an electric network, and also perfections of normative base on providing of safety of operating constructions.

Keywords: overhead lines, metal constructions, defects, remaining resource, reliability.

Основные понятия и показатели надёжности электросетевых конструкций

Устойчивый рост отказов, необходимость поиска внебюджетных форм финансирования мероприятий по поддержанию надёжности электрических систем на достаточном уровне, требования предоставления гарантий обеспечения безаварийной работы в случае смены собственника энергосистем обусловили исследования надёжности и безопасности энергосистем вообще и электросетевых конструкций в частности.

Проблема надёжности электрических систем относится к задачам определения и оптимизации их показателей на этапах планирования, проектирования, сооружения и особенно эксплуатации, поскольку около 30 % существующих ВЛ были введены в эксплуатацию более 40 лет назад, т. е. степень износа конструкций составляет около 40 % [1–4, 6–7, 11].

В последние годы зарегистрировано целый ряд возникновения ограничения выдачи мощности электростанций, причем на долю ВЛ 35–750 кВ приходится значительная часть отказов и отключений электрического оборудования (~ 35–50 %) [1–6, 23]. В таблице 1 приведены причины аварий, которые наиболее вероятны [24]. Очевидно, что наибольшая доля аварийных отключений ВЛ связана с повреждением, в

конечном итоге, проводов и грозозащитных тросов (52 %), изоляторов (31 %) и опор (13 %). На арматуру и прочие элементы ВЛ приходится 4 % отключений. Из чего можно сделать вывод, что опоры являются достаточно надёжным элементом линий электропередачи, однако разрушения опор имеют наиболее тяжелые последствия и приводят к большим затратам, связанным с восстановлением ВЛ и недоотпуском электроэнергии.

Указанное распределение причин отключений ВЛ в значительной степени обусловлено:

- несвоевременным выявлением и устранением ошибок, допущенных при проектировании и строительстве ВЛ;
- низким уровнем организации и культуры эксплуатационно-ремонтного обслуживания;
- недостаточным контролем технического состояния линий и отдельных их конструктивных элементов в ходе эксплуатации;
- недостаточным использованием средств борьбы с влиянием природно-климатических факторов на надёжность работы ВЛ – для предотвращения вибрации и пляски проводов и грозозащитных тросов, повышения грозупорности линий, защиты фундаментов опор ВЛ от воздействия агрессивных сред;
- слабой организацией профилактической работы с населением, административным

Таблица 1. Распределение отказов по элементам ВЛ

Элементы ВЛ	Поток отказов в % от общего количества	
	Без учета грозовых перенапряжений	С учетом грозовых перенапряжений
Опоры	9	13
Провода и тросы	37	52
Изоляторы	23	31
Арматура	3	4

персоналом сельскохозяйственных, лесотехнических и промышленных предприятий по охране ВЛ и недопущению в отношении них вандализма.

Все приведенные факты свидетельствуют не только о слабой организации профилактической работы по охране ВЛ, но и о низком качестве, недостаточных объемах и нерегулярности осмотров ВЛ линейным и инженерно-техническим персоналом электросетевых предприятий. Нередко планирование работ по текущему обслуживанию и ремонту ВЛ осложняется низким качеством заполнения либо отсутствием полного объема листов обхода и недостаточно профессиональным их анализом. Анализ проблем по передаче электроэнергии показывает, что подобная ситуация в настоящее время возникла на всей территории постсоветского пространства [5, 23]. Причем, весьма очевидно, что сверхрасчетные климатические условия являются основным фактором, влияющим на возникновение аварийных ситуаций, в энергосистемах Украины ежегодно происходит несколько десятков случаев повреждения грозотросов и проводов, причем половина из них с обрывами. Экстраординарные гололёдные и изморозевые отложения на проводах и грозозащитных тросах ВЛ наблюдаются в Украине на Крымском полуострове, и в западных областях имеют место зоны, где систематически образуются опасные гололёдные отложения на тросах и проводах ВЛ. Проблема эксплуатации ВЛ усугубляется в районах, подверженных гололедообразованию и значительным ветровым нагрузкам, однако наряду с природными явлениями значительное количество отказов связано со старением основных фондов. Не снижается количество аварийных отключений ВЛ, обусловленных проявлениями вандализма, что в сумме приводит к значительному числу отключений электроэнергии.

Следует отметить, что единственно верной информацией о действительном состоянии линии

являются отказы, однако статистической информации зачастую недостаточно для определения истинных причин возникновения аварии, вследствие отсутствия данных о состоянии объекта до наступления отказа [6–10]. Общеизвестно, что аварии, вызванные одной причиной, происходят редко. В большинстве случаев авария происходит вследствие совпадения двух или нескольких причин, которые только совместным воздействием исчерпывают запас прочности конструкции. В таких случаях при определении причин указывается не следствие ряда наложения критериев, а наиболее явный показатель, что затрудняет определение причин на основе статистической информации, т. е. удается обычно выявить причину, влияние которой на возникновение аварии можно определить как решающее. По металлическим опорам статистика отказов была проведена в работах [1, 2, 4, 8, 10, 11].

Наиболее часто встречающиеся дефекты металлических опор представлены на рис. 1–3.

Контроль технического состояния элементов ВЛ в эксплуатации включает следующие виды технических мероприятий: осмотры, профилактические проверки, обследования. Необходимость проведения обследования определяется результатами осмотров и профилактических проверок, выполняемых квалифицированными экспертами специализированных организаций.

Специализированные организации целесообразно привлекать к следующим работам по оценке технического состояния элементов ВЛ:

- испытания конструкций и других элементов;
- проведение поверочных расчетов элементов;
- определение структуры и расчетного сопротивления металлоконструкций опор при отсутствии проектной документации;
- определение фактической прочности элементов металлических опор и фундаментов неразрушающими методами;
- проведение механических испытаний опор;

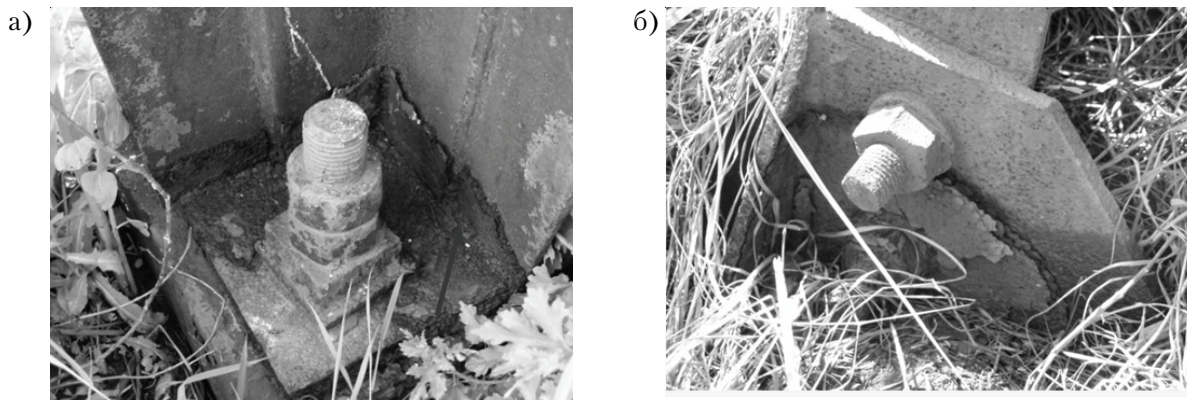


Рисунок 1. Коррозионные поражения опорных элементов: а – поясных элементов, опорной плиты, анкерных болтов; б – косынок базы (башмака).

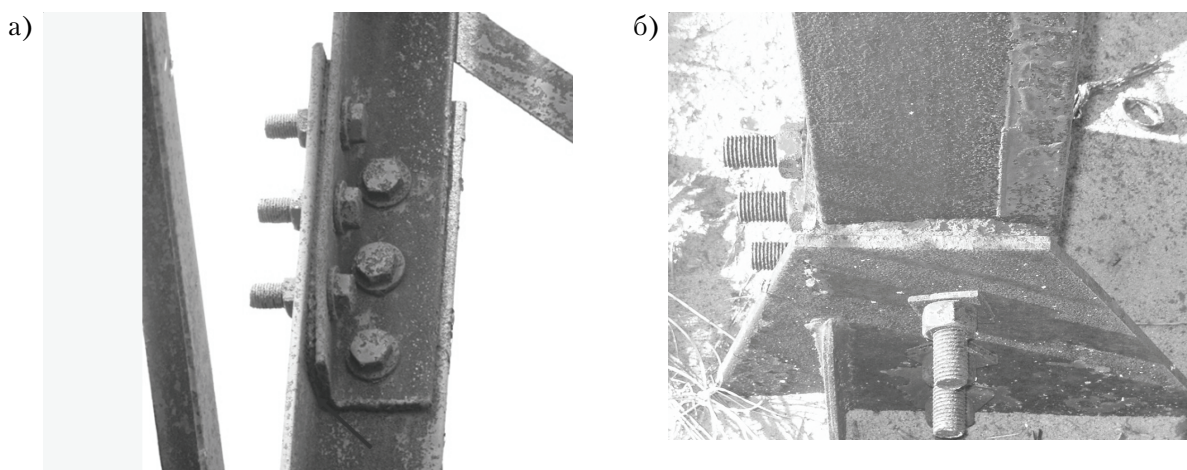


Рисунок 2. Щелевая коррозия в многоболтовых соединениях: а – на стыке поясов; б – на стыке пояса и фасонки опоры.

- проведение испытаний линейной изоляции; определение фактической прочности проводов, грозозащитных тросов и линейной арматуры;
- обнаружения значительных отступлений от проекта при наличии массовых дефектов и повреждений;
- увеличения по сравнению с проектом нагрузок на опоры, увеличения пролетов, замены проводов и тросов на большие сечения, изменения расчетных ветровых и гололедных нагрузок.

По результатам обследований определяется возможность эксплуатации ВЛ с определенным остаточным ресурсом.

Остаточный ресурс объекта – интервал времени эксплуатации строительного объекта от

текущего момента до момента достижения им предельно допустимого значения риска аварии.

Определение остаточного ресурса напрямую связано с характеристиками надежности металлических конструкций ВЛ, т. е. с соответствием конструкции требованиям проекта в части обеспечения ее прочности, жесткости, устойчивости, а также оценки общих характеристик, таких как: безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость.

Анализ методов определения остаточного ресурса объекта

Много обстоятельств привели к тому, что обеспечение надежности энергетических систем стало ключевой проблемой современной

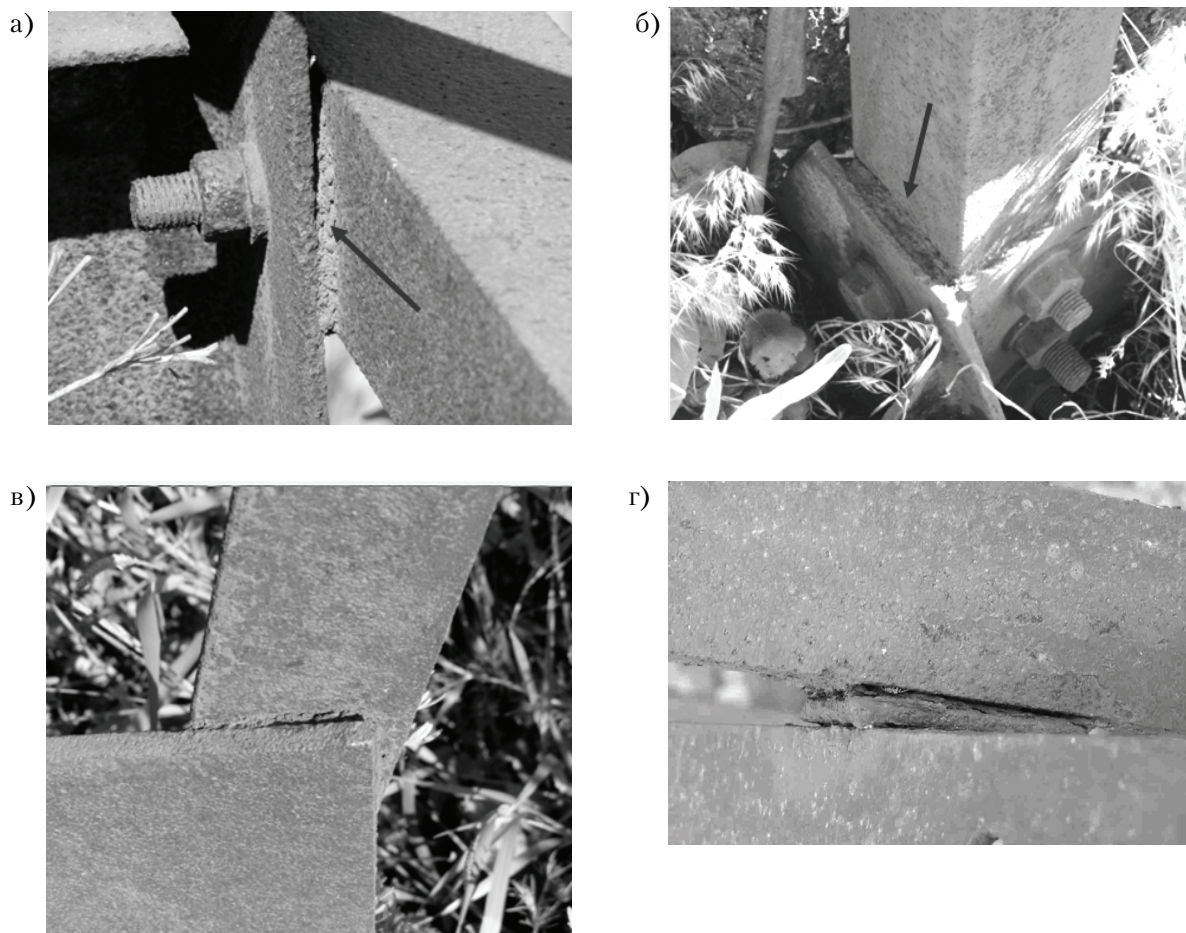


Рисунок 3. Щелевая коррозия в сварных и одноболтовых соединениях решетки опор: а – в болтовом узле крепления решетки; б – в узле стыка пояса с опорным башмаком; в – в узле крепления элемента на сварке; г – в сварных узлах перекрестной решетки.

энергетики. Связь между энергосистемой, ее элементами и внешней средой носит стохастический (вероятностный) характер, и можно говорить лишь о вероятности полного достижения энергосистемой своей цели – передачи электроэнергии потребителю. Поэтому надежность работы энергосистемы всегда включает отказ, что в ряде случаев является исчерпанием остаточного ресурса, переводящее работоспособное состояние объекта в неработоспособное.

Надежность конструкции, как и ее остаточный ресурс невозможно определить без оценки технического состояния, соответственно действительной работы сооружения. В основе расчетов остаточного ресурса конструкций заложен метод предельных состояний, классика которого заложена в работах В. В. Болотина, А. Р. Ржаницина, Н. С. Стрелецкого, В. Д. Райзера и других авторов.

Нормирование надежности в методе предельных состояний отсутствует вследствие обеспечения выбора расчетной схемы, нагрузок, механических свойств материалов при соответствии действующим нормам проектирования и расчета [13–22]. Однако из-за свойств материала и вероятностного характера нагрузок переход за предельное состояние может иметь место, хоть вероятность и не велика, причем по действующим нормам эта вероятность допустима. Так, экспоненциальный закон надежности имеет вид:

$$P(t) = \exp(-\lambda t), \quad (1)$$

где с течением времени не меняется опасность отказа $\lambda(t)$, т. е. $\lambda(t) = \lambda = \text{const}$.

Однако вероятность безотказной работы на данном интервале $(t, t+\tau)$ не учитывает предшествующего периода эксплуатации (время работы), учитывается лишь длина интервала τ .

Это значит, что закон не выполняется для систем, свойства которых изменяются во времени.

Т. к. ВЛ – восстанавливаемый объект, находящийся в эксплуатации долгое время, то более точно показатель безотказности (параметр потока отказов) в общем случае следовало бы представлять как $\omega(t)$ – функция времени [13, 14]. На величину « ω » влияют: факторы старения и износа элементов, а также плановые ремонты (рис. 4):

$$\omega(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{M[r(t + \Delta t)] - M[r(t)]}{\Delta t}, \quad (2)$$

где M – математическое ожидание отказов ВЛ;
 $r(t)$ – число отказов за время t ;
 $r(t + \Delta t)$ – число отказов за время $(t + \Delta t)$;
 $\omega(t)$ – среднее число отказов, ожидаемых в малом интервале времени.

Из анализа причин отказа ВЛ следует:

$$\omega = \omega_1(t) + \omega_2, \quad (3)$$

где ω – поток отказов ВЛ;

$\omega_1(t)$ – связан с износом и старением ω_2 ВЛ и зависит от срока службы ВЛ;

ω_2 – связан с внешними воздействиями на ВЛ. Поток отказов « $\omega_1(t)$ » вызывается коррозией металлических опор, износом арматуры, проводов, тросов, разрушением изоляторов, составляющая потока « ω_2 » связана с гололедно-ветровыми нагрузками, дефектами монтажа, обрывами проводов, ударами молний, ледоходом, пожарами и т. д.

Величина $\omega_2 = \text{const}$ и не зависит от длительной эксплуатации, капитальных ремонтов, т. е. определяется случайными причинами.

Однако в эксплуатационной и проектной практике для ВЛ в период нормативного срока службы пользуются значением среднего потока отказов « $\omega_{\text{ср}}$ », не зависящего от срока службы ВЛ. Периодичность капитальных ремонтов ВЛ принимается 3–6 лет.

С вероятностью безотказной работы ВЛ связано понятие функции надёжности ВЛ – $p(t)$:

$$p(t) = 1 - \sum p^i(t) q^i(t), \quad (4)$$

где i – возможные состояния ВЛ;

$p^i(t)$ – вероятность нахождения ВЛ в момент времени « t » в состоянии « i »;

q^i – вероятность нарушения надёжности ВЛ в момент времени « t » в состоянии « i ».

Методика доступна обычному инженеру, удобна в реализации, но не отражает реальной работы конструкции как системы с последовательно и параллельно соединенными элементами.

Еще одной методикой обеспечения надежной работы конструкции является принятие определенного значения безотказности, которую оценивают при помощи вероятностей безотказной работы P_s или отказа P_f [15, 17]. Для вычисления вероятности безотказной работы ВЛ рекомендовано использование зависимости [18]:

$$P_{s\text{ВЛ}} = \chi_i P_v P_{vp} P_p, \quad (5)$$

где χ_i – коэффициент снижения прочности элемента, наиболее часто подвергающегося действию предельно допустимых нагрузок;

$$P_v = \exp\left(-\frac{N}{T_v}\right); P_{vp} = \exp\left(-\frac{N}{T_{vp}}\right);$$

$$P_p = \exp\left(-\frac{N}{T_p}\right), \quad (6)$$

где T_v, T_{vp} и T_p – периоды повторяемости ветровой нагрузки, нагрузки от ветра при гололеде и гололедной нагрузки, соответственно.

Методика, несмотря на ее простоту и удобство в практическом применении, не учитывает все особенности работы конструкции (различные дефекты и повреждения, появившиеся вследствие разного рода воздействия на них), что связано с применением коэффициента χ_i .

ВЛ представляют собой сложные системы, состоящие из множества взаимодействующих друг с другом разнородных элементов, число которых может достигать десятков, а в некоторых случаях и сотен. Моделирование сложных систем позволяет исследовать особенности их функционирования в различных условиях,

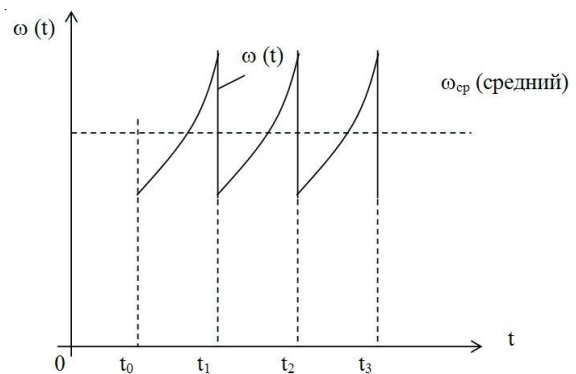


Рисунок 4. Факторы, влияющие на параметр потока отказов: t_1, t_2, t – момент времени выполнения капитальных ремонтов; t_0 – окончание приработки (периода освоения).

наделять их требуемыми характеристиками и снижать риск возникновения чрезвычайных ситуаций (отказов). В построенной математической модели сложной системы учитывают каждый из ее многочисленных элементов. Методики такого рода моделирования приводятся в [21, 22], однако при рассмотрении оказывается, что для решения задачи моделирования необходимо создание соответствующего математического аппарата с поддержкой программным комплексом, причем математические выкладки далеки от инженерных. Этот факт приводит к значительным затруднениям при определении надежности конструкций.

Все вышеизложенные методики не рассматривают качество работы сооружения, т. е. речь идет о способности объекта выполнять (нормальная работа) или не выполнять (отказ) свои функции. Как выяснилось, при создании систем энергоснабжения зачастую сведений о надежности аналогов не существует, а также в системах, где реализованы редкие воздействия аварийного характера, возникает задача, не имеющая вероятностного описания, т. е. необходимо решение задачи эксплуатации при условии отказа какой-то части системы или элемента. Здесь имеет место понятие живучести конструкции как неотъемлемой части надежности энергоснабжения потребителей.

В электроэнергетике понятие живучести имеет довольно «узкий» смысл и подразумевает свойство объекта противостоять возмущениям, не допуская их каскадного развития с массовым нарушением питания потребителей на длительное время. Классическим примером может являться авария на ВЛ 330 кВ «Каховская – Джанкой», произошедшая в ночь с 18 на 19 декабря 2009 года [6, 7].

Идея применения схемы главных и второстепенных конструкций не нова, главная цель заключается в сохранении целостности конструкции, точнее элементов и их систем, обеспечивающих безотказность работы конструкции при минимизированных затратах на восстановление. Проектирование этих конструкций следует вести по схеме минимизации разрушений при возникновении аварийной ситуации. Решать эту задачу следует за счет исключения возможности разрушения любого из ответственных элементов и (или) при проектировании учитывать возможность элемента или системы элементов,

которые наиболее ответственны, сохранять работоспособность в период времени, достаточный для принятия срочных мер по устранению последствий отказа.

В Украине деятельность по предотвращению аварий строительных конструкций сталкивается прежде всего с финансовыми трудностями. За последние годы вложения в электрические сети 35–750 кВ составили 18 % общих вложений в электроэнергетику, в то время как в странах с развитой электроэнергетикой эта доля достигает 22–36 %. В то же время, по оценкам специалистов, главными причинами аварий электросетевых конструкций является несвоевременное выполнение работ по восстановлению разрушенной антикоррозионной защиты, усилению прокорродировавших элементов и узлов, ремонту фундаментов и пр., в основном, из-за недостаточности средств на поддержание конструкций в работоспособном состоянии. В существующих условиях недостаточность мер по обеспечению надежности и безопасности эксплуатируемых электросетевых конструкций обусловлена, прежде всего, имущественной обособленностью их владельцев. Поскольку и государство также в настоящее время лишено возможности широкого маневрирования финансовыми ресурсами для реализации указанных мероприятий, наиболее реальным способом обеспечения инженерной защиты строительных конструкций и возмещения ущерба в случае наступления аварийных событий является страхование, основанное на данных экспертной оценки технического состояния.

Решение общих задач совершенствования нормативной базы по обеспечению инженерной защиты эксплуатируемых строительных конструкций позволяет разработать должную нормативную основу, регламентирующую деятельность страховых компаний в данной области. Основной организационной формой обеспечения конструктивной безопасности является своевременная оценка технического состояния строительных конструкций в процессе освидетельствования и обследования, оценка степени конструктивных рисков, а также создание денежного страхового фонда целевого назначения, средства из которого направляются на мероприятия по инженерной защите и возмещение убытков вследствие аварий строительных конструкций.

Конструктивные и эксплуатационные особенности объекта исследования

Анализ причин отказов ВЛ, проведенный исследовательскими учреждениями (ОРГРЭС, ВНИИЭ, институт «Энергосетьпроект», ДонНАСА), показывают, что интенсивность отказов зависит от срока службы ВЛ. Например, эта зависимость для ВЛ 35–330 кВ на металлических опорах, которые в основном были сооружены в 60–70 годы в СССР, иллюстрируется графиком на рис. 5 [24].

Актуальность и необходимость технического перевооружения ВЛ продиктованы физическим и моральным износом электрических сетей, но при этом требованиями повышения их пропускной способности [12]. Моральный износ вызван техническим старением в результате научно-технического прогресса, а физический износ – отработкой ВЛ срока эксплуатации. Проблемы морального износа решаются техническим перевооружением, а физического – реконструкцией и капитальным ремонтом. Структура отказов показывает на очередность проведения мероприятий по повышению надежности:

- повышение нагрузок от ветра и гололеда на стадии проектирования нового строительства и реконструкции старых сетей. Проведение перерасчета опор старой унификации на нагрузки УкрПУЭ (издание 2006 года) и создание новой унификации опор;
- повышение качества эксплуатации на основе улучшения диагностики состояния элементов опор и проведения своевременного ремонта. Техническое перевооружение и реконструкция являются основой повышения надежности на стадии эксплуатации.

К настоящему времени назрела необходимость в коренном обновлении электрических сетей, создании линий нового поколения, отвечающих экономико-экологическим требованиям и современному техническому уровню по долго-

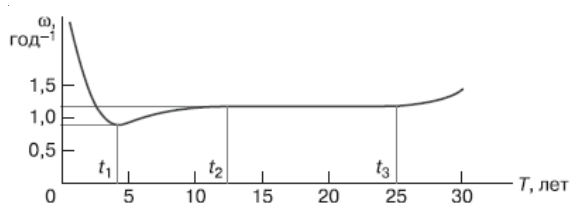


Рисунок 5. График зависимости интенсивности отказов от срока службы для ВЛ 35–330 кВ на металлических опорах.

вечности и надежности. Одним из направлений развития является применение новых конструкций и материалов, позволяющих довести срок службы вновь строящихся и реконструируемых линий до 70 и более лет.

К числу задач, решаемых на уровне проектирования и эксплуатации электрической сети на верхнем уровне рассмотрения, относятся:

- проведение профилактических работ на электросетевых объектах с учётом обеспечения надёжности электроснабжения;
- разработка политики по страхованию ответственности за нарушение договорных обязательств по надёжности электроснабжения;
- разработка требований к поставщикам электрической энергии с позиций обеспечения надёжности электроснабжения;
- разработка нормативной базы для надёжности электроснабжения потребителей;
- выявление территориальных зон повышенной опасности для работы электрической сети.

Приведенные примеры свидетельствуют об актуальности проблемы обеспечения надёжности в работе систем электроэнергетики.

В связи с изложенным стоит задача разработки инженерных методик анализа аварийности в электрической сети и алгоритмов расчёта показателей надёжности по статистическим данным.

Выводы:

1. В связи со значительным износом существующего парка электросетевых конструкций, требованиями гарантии надёжности эксплуатации в рыночных условиях, ужесточением требований к безопасности конструкций остро стоит вопрос о необходимости разработки методики расчетной оценки риска аварии по результатам обследований.
2. Существующие методы оценки риска не учитывают комплексно различные виды несовершенств элементов опор ВЛ, срок эксплуатации и действующие нагрузки, что приводит к снижению качества работы сооружения.
3. Для использования эффективного экономического механизма страхования в целях инженерной защиты существующих объектов необходимо совершенствование нормативной базы по обеспечению безопасности эксплуатируемых строительных конструкций с разработкой должной нормативной основы.

Литература

1. Аэродинамика электросетевых конструкций [Текст] : Монография / [Е. В. Горохов, М. И. Казакевич, С. Н. Шаповалов, Я. В. Назим]; под ред. Е. В. Горохова, М. И. Казакевича. – Донецк : [б. и.], 2000. – 336 с.
2. Ветровые и гололедные воздействия на воздушные линии электропередачи [Текст] : Монография / [Е. В. Горохов, М. И. Казакевич, С. В. Турбин, Я. В. Назим]; под ред. Е. В. Горохова. – Донецк : [б. и.], 2005. – 348 с.
3. Масові пошкодження в електричних мережах України, що сталися наприкінці листопада та початку грудня 2000 р. [Текст] : Висновки комісії щодо механічної стійкості пошкоджених електричних мереж України. Пропозиції з підвищення рівня їх надійності / Мінпаліверенго України. – К. : Мінпаліверенго України, 2000. – 9 с.
4. Повышение надежности и долговечности электросетевых конструкций [Текст] : [Моногр.] / Е. В. Горохов, С. Н. Шаповалов, Е. И. Удод [та ін.] / Под ред. Е. В. Горохова. – К. : Техніка, 1997. – 284 с.
5. Яковлев, Л. В. Повышение надежности воздушных линий на стадиях проектирования и эксплуатации [Текст] / Л. В. Яковлев, Ф. Л. Коган, Р. С. Каверина // Электрика. – 2008. – № 1. – С. 32–38.
6. Анализ причин и последствий аварий на участках ВЛ 330 кВ Джанкойских МЭС Крымской электроэнергетической системы НЭК «Укрэнерго» [Текст] / Е. В. Горохов, С. Н. Бакаев, Я. В. Назим [и др.] // Металеві конструкції. – 2010. – Том 16, № 2. – С. 75–92.
7. Пути повышения надежности ВЛ с учетом координации прочности элементов в районах с повышенными гололедно-ветровыми нагрузками [Текст] / Е. В. Горохов, Я. В. Назим, В. Н. Васылев [и др.] // Сучасне промислове та цивільне будівництво. – 2010. – Т. 6, № 2. – С. 113–130.
8. Горохов, Е. В. Оценка надежности стальных электросетевых конструкций [Текст] / Е. В. Горохов, С. Н. Шаповалов, М. Е. Самойленко // Международная конференция «Металлостроительство-96» (Состояние и перспективы развития) : Сборник трудов. В 2-х томах. Т. 1 / Редкол.: Е. В. Горохов, А. М. Югов, С. В. Колесниченко. – Макеевка : ДонГАСА, 1996. – С. 31–36.
9. Горохов, Е. В. Оценка надежности стальных электросетевых конструкций [Текст] / Е. В. Горохов, С. Н. Шаповалов, М. Е. Самойленко // Известия вузов. Строительство. – 1996. – № 11. – С. 16–22.
10. Перельмутер, А. В. Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций [Текст] / А. В. Перельмутер. – К. : Изд-во УкрНИИпроектстальконструкция, 2000. – 216 с.
11. Стан та залишковий ресурс фонду будівельних металевих конструкцій в Україні [Текст] / А. В. Перельмутер, В. М. Гордеев, Є. В. Горохов [та ін.]; За ред. А. В. Перельмутера. – К. : Сталь, 2002. – 166 с.

References

1. Gorokhov, Ye. V. (Ed.); Kazakevich, M. I. (Ed.); Shapovalov, S. N.; Nazim, Ya. V. Aerodynamics of the power supply structures. Monograph. Donetsk, 2000. 336 p. (in Russian)
2. Gorokhov, Ye. V. (Ed.); Kazakevich, M. I.; Turbin, S. V.; Nazim, Ya. V. Wind and ice loading on overhead power transmission lines. Monograph. Donetsk, 2005. 348 p. (in Russian)
3. Mass damage in electric frontier lines of Ukraine happened at the end of November and at the beginning of December, 2000. Conclusions of the commission about mechanical durability of broken down electric frontier lines of Ukraine. Propositions of their reliability level increase. Kyiv: Minpalivenergo of Ukraine, 2000. 9 p. (in Ukraine)
4. Gorokhov, Ye. V. (Ed.); Shapovalov, S. N.; Udod, E. I. et al. Reability level increase and life duration of electricity supply network constructions. Kyiv: Technique, 1997. 284 p. (in Russian)
5. Yakovlev, L. V.; Kogan, F. L.; Kaverina, R. S. Reliability growth of aerial lines at the design stage and electrician operation. In: *Electrics*, 2008, No. 1, p. 32–38. (in Russian)
6. Gorokhov, Ye. V.; Bakaev, S. N.; Nazim, Ya. V. [et al.] Failure cause and consequence analysis at the OPTL 330 kV line sections of the Dzhankoy local electrical power station of the Crimean electrical power system of the NEC «Ukrenerg». In: *Metal Constructions*, 2010, Tom 16, No. 2, p. 75–92. (in Russian)
7. Gorokhov, Ye. V.; Nazim, Ya. V.; Vasylev, V. M.; Leshchenko, O. O.; Garanzha, I. M.; Smirnova, N. S. Ways of increasing overhead power transmission line reliability regarding the coordination of component strength in the areas with a higher ice and wind loads. In: *Modern Industrial and Civil Construction*, 2010, T. 6, No. 2, p. 113–130. (in Russian)
8. Gorokhov, Ye. V.; Shapovalov, S. N.; Samoilenko, M. E. Reliability evaluation of steel electricity supply network constructions. International conference steel building. State and perspective of development. Collected works. In two parts. T. 1. Makiivka: DCASEA, 1996, p. 31–36. (in Russian)
9. Gorokhov, Ye. V.; Shapovalov, S. N.; Samoilenko, M. E. Reliability evaluation of steel electricity supply network constructions. In: *Institutes news. Civil engineering*, 1996, No. 11, p. 16–22. (in Russian)
10. Perelmuter, A. V. Select problems of reliability and safety of building constructions. Kyiv:UkrNIIProekststalkonstruktsiia, 2000. 216 p. (in Russian)
11. Perelmuter, A. V. (Ed.); Gordeev, V. M.; Gorokhov, Ye. V. et al. State and residual resource of fund of building metal construction in Ukraine. Kyiv: Steel, 2002. 166 p. (in Ukrainian)
12. Nazim, Ya. V.; Chernykh, T. Yu. Improvement operational characteristics of power supply structures at reconstruction. In: *Metal Constructions*, 2007, T. 13, No. 4, p. 211–219.
13. Gnedenko, B. V.; Beliaev, Yu. K.; Solovev, A. D. Mathematical methods of theory of reliability.

12. Nazim, Ya. V. Improvement operational characteristics of power supply structures at reconstruction [Текст] / Ya. V. Nazim, T. Yu. Chernykh // *Металеві конструкції*. – 2007. – Т. 13, № 4. – С. 211–219.
13. Гнеденко, Б. В. Математические методы в теории надежности [Текст] : [Моногр.] / Б. В. Гнеденко, Ю. К. Беляев, А. Д. Соловьев. – М. : Наука, 1965. – 524 с.
14. Фокин, Ю. А. Оценка надежности систем электроснабжения [Текст] : [Моногр.] / Ю. А. Фокин, В. А. Туфанов. – М. : Энергоиздат, 1981. – 224 с.
15. Китушин, В. Г. Надежность энергетических систем [Текст] : [Моногр.] / В. Г. Китушин. – М. : Высш. шк., 1984. – 256 с.
16. Бухарин, Е. М. О вероятностных методах расчета строительных конструкций [Текст] / Е. М. Бухарин // *Проектирование и эксплуатация энергетических систем и электрических сетей* : Научн. тр. / ВГПИ и НИИ «Энергосетьпроект». – М. : Энергосетьпроект, 1979. – Вып. 18. – С. 21–42.
17. Гнеденко, Б. В. Математические методы в теории надежности [Текст] : [Моногр.] / Б. В. Гнеденко, Ю. К. Беляев, А. Д. Соловьев. – М. : Наука, 1965. – 524 с.
18. Райзер, В. Д. Расчет и нормирование надежности строительных конструкций [Текст] : [Моногр.] / В. Д. Райзер. – М. : Стройиздат, 1995. – 352 с.
19. Нарожний, В. Б. Кліматичні навантаження на повітряні лінії електромереж [Текст] : [Моногр.] / В. Б. Нарожний, С. Я. Княжевська, Л. В. Глей. – К. : Енергопрогрес, 1994. – 212 с.
20. Савоськин, Н. Е. Надежность электрических систем [Текст] : Учебное пособие / Н. Е. Савоськин. – Пенза : Изд-во Пензенского гос. ун-та, 2004. – 101 с.
21. Кочкаров, А. А. Обеспечение стойкости сложных систем. Структурные аспекты [Текст] / А. А. Кочкаров, Г. Г. Малинецкий. – М. : ИПМ им. М. В. Келдыша РАН, 2005. – 34 с.
22. Кононов, Д. А. Синтез формализованных сценариев и структурная устойчивость сложных систем (синергетика и аттрактивное поведение) [Текст] / Д. А. Кононов, В. В. Кульба, С. С. Ковалевский [и др.]. – М. : Институт проблем управления, 1998. – 103 с.
23. РД 153-34.3-20.524-00. Положение об экспертной системе контроля и оценки состояния и условий эксплуатации воздушных линий электропередачи 110 кВ и выше [Текст]. – Изд. офиц. – Ввод. 01.12.2000. – М. : РАО «ЕЭС России», 2000. – 39 с. – (Руководящий документ).
24. Каверина, Р. Повышение надежности воздушных линий 35–750 кВ: комплекс работ и предложений [Текст] / Р. Каверина, Ф. Коган, Л. Яковлев // *Новости ЭлектроТехники*. – 2007. – № 4(46). – С. 81–84.
- Monograph. Moscow: Science, 1965. 524 p. (in Russian)
14. Fokin, Yu. A.; Tufanov, V. A. Reliability evaluation of power-supply system. Monograph. Moscow: Energoizdat, 1981. 224 p. (in Russian)
15. Kitushin, V. G. Reliability of power system. Monograph. Moscow: High School, 1984. 256 p. (in Russian)
16. Buharin, E. M. About probability methods of structural analysis. In: *Design and power system and network operation*. Moscow: Energosetproekt, 1979. Issue 18, p. 21–42. (in Russian)
17. Gnedenko, B. V.; Beliaev, Yu. K.; Solovev, A. D. Mathematical methods of theory of reliability. Monograph. Moscow: Science, 1965. 524 p. (in Russian)
18. Raizer, V. D. Reliability calculation and normalization of building constructions. Monograph. Moscow: Stroiizdat, 1995. 352 p. (in Russian)
19. Narozhnii, V. B.; Kniazhevskaya, S. Ya.; Gleib, L. V. Climatic load on wind line power lines. Monograph. Kyiv: Energoprogress, 1994. 212 p. (in Ukrainian)
20. Savoskin, N. E. Reliability of electric power systems. Textbook. Penza: PSU, 2004. 101 p. (in Russian)
21. Kochkarov, A. A.; Malinetskii, G. G. Durability control of complex network. Structural aspects. Moscow: IPM named in honor of M. V. Keldysh RAS, 2005. 34 p. (in Russian)
22. Kononov, D. A.; Kulba, V. V.; Kovalevskii, S. S. et al. Synthesis of formalized scripts and structural stability of complex networks (synergetics and attractive mode of behavior). Moscow: Institute of control problems, 1998. 103 p. (in Russian)
23. РД 153-34.3-20.524-00. State about expert system of control and estimate of state and operation conditions of overhead electric line. Moscow: RAO «EES Russia», 2000. 39 p. (guideline document) (in Russian)
24. Kaverina, R.; Kogan, F.; Yakovlev, L. Reliability growth of overhead line, set of works and propositions. In: *Electrical engineering news*, 2007, No. 4(46), p. 81–84. (in Russian)

Смирнова Наталія Сергіївна – асистент кафедри металевих конструкцій Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: експлуатаційна надійність та довговічність електромережових конструкцій, забезпечення безвідмовності повітряних ліній електропередавання на основі теорії управління ризиками.

Смирнова Наталья Сергеевна – асистент кафедры металлических конструкций Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: эксплуатационная надежность и долговечность электросетевых конструкций, обеспечение безотказности воздушных линий электропередачи на основе теории управления рисками.

Nataliya Smirnova – a teaching fellow of the Metal Structures Department of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Research interests: operational reliability and durability of power supply structures, no-failure supply of overhead power lines on the basis of the risk management theory.