

КРИТЕРИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ. СТАНДАРТ СЕI 60826

Яковлев Л.В. **Каверина Р.С.**

Рассматриваются основные критерии проектирования различных элементов ВЛ в свете требований различных нормативных документов, в том числе зарубежных. Предлагается усовершенствованный подход к учету климатических нагрузок на элементы ВЛ на основе вероятностного и полувероятностного подхода с учетом экономических составляющих при отказах.

Международной энергетической комиссией в 2003 году принят Стандарт СЕI 60826 «Критерии проектирования воздушных линий электропередачи». Это третье издание отменяет и заменяет второе издание, которое вышло в виде технического отчета в 1991 году. Оно представляет собой технический пересмотр отчета и приобретает статус Международного стандарта.

Данный пересмотр заключается главным образом в разделении стандарта на две части: одну – нормативную и другую - информативную, упрощении его содержания и повышении некоторых требований к проектированию в соответствии с последними технологическими достижениями.

Настоящий Международный стандарт определяет критерии нагрузки и механического сопротивления воздушных линий электропередачи на основе разработанных принципов надежности. Эти критерии применимы к линиям с номинальным напряжением от 45 кВ и более, но могут также применяться к линиям с более низким номинальным напряжением.

Настоящий стандарт также представляет собой базу для составления национальных стандартов воздушных линий электропередачи на основе критериев надежности, а также вероятностных или полувероятностных методов. В этих национальных стандартах необходимо определить местные климатические данные, которые должны учитываться для использования и применения настоящего стандарта, а также другие специфические национальные данные.

Критерии расчета, содержащиеся в настоящем стандарте, применяются к вновь устраиваемым линиям, однако, большое число рассматриваемых понятий могут использоваться для нужд обеспечения надежности существующих линий, требующих ремонта или модернизации с повышением характеристик.

В России основным документом при проектировании воздушных линий электропередачи является ПУЭ 7-го издания 2003 года, раздел 2, главы 2.4 и 2.5. Принятые в ПУЭ 7-го издания коэффициенты надежности, региональные коэффициенты и так далее, носят детерминистический характер, которые по сути принятых исходных положений расчетов в ПУЭ не являются таковыми.

Поэтому, поставленная задача в ПУЭ 7-ого издания по обеспечению надежного и качественного электроснабжения и экономической эффективности ВЛ не может быть решена традиционными способами и должна, в первую очередь, решаться вероятностным и полувероятностным расчетом при проектировании как это принято в Стандарте СЕI 60826 «Критерии проектирования воздушных линий электропередачи».

Эта задача сводится к установлению уровня надежности ВЛ при достаточной экономической эффективности, в сохранности ВЛ при авариях, исключающих каскадные повреждения ВЛ, и обеспечении безопасности при строительстве и эксплуатации. В таком плане ПУЭ не получили развитие и их необходимо дополнить руководством для его применения с разделом «Сочетание нагрузок. Нормативные и расчетные нагрузки». В этом разделе необходимо предусмотреть установление уровня надежности (вероятность выживания) ВЛ исходя из повторяемости *расчетных* климатических нагрузок определяющих степень надежности и дать все необходимые исходные основы для проектирования. Окончательная степень надежности должна устанавливаться на основе равенства дополнительных затрат по строительству ВЛ и затрат на ее восстановление при авариях и возмещение потерь потребителей.

Проектные критерии нагрузок должны быть представлены в дополнительном разделе норм и основаны на вероятностном и полувариантном подходе. Они устанавливают коэффициенты по нагрузке и прочности в противоположность детерминистическим методам. Хотя вероятностные подходы открыто признают, что имеется риск превышения нагрузок, но они снижают его до приемлемого низкого уровня. Расчет должен давать различные уровни надежности в зависимости от важности линии в системе электроснабжения и так же откликаться на изменения требований общественной безопасности. Такие методы расчета изложены в рекомендациях МЭК для ВЛ класса 45кВ и выше. Они позволяют оценить надежность существующих линий или проектировать новые линии с целевой надежностью, при условии наличия данных, требуемых для такого анализа.

Однако признано, что для многих мест и ситуаций большая часть данных отсутствуют, что не дает уверенности при расчете абсолютной надежности. В таких случаях рекомендуемые критерии будут эффективны для оценки относительной надежности различных проектов ВЛ. Нужно отметить, что в мировой практике при проектировании ВЛ с целевой надежностью считается достаточной при периодах повторяемости 50, 150 и 500 лет, каждый из которых соответствует различному уровню надежности. Проведенные пробные расчеты показали, что коэффициенты γ_{nw} , γ_p и другие (ПУЭ 7), корректирующие расчетные нагрузки, при проведении расчетов на периоды повторяемости 50, 150 и 500 лет не будут превышать значений, указанных в ПУЭ, а в большинстве случаев они будут ниже, что можно показать на приведенных ниже примерах на основе логичных рассуждений и пробных расчетов.

При проектировании ВЛ необходимо учитывать, что ВЛ -это система, состоящая из компонентов: промежуточные, угловые и концевые опоры, провода, изоляторы, арматура. Надежность системы является функцией надежности ее компонентов. Если надежность (вероятность выживания) компонентов примерно одинакова, то вероятность выживания системы равна произведению вероятностей выживания каждого компонента. В случаях, где надежность компонентов выше, чем 1^{10-2} , что является типичным для ВЛ, и один компонент имеет надежность ниже на один порядок, чем надежность системы то она может определена этим элементом. Наиболее слабым элементом являются промежуточные опоры, для которых при вероятности не достижения расчетной прочности до 10% (надежность по материалу 1^{10-2} практически имеют все компоненты ВЛ) их коэффициент запаса прочности по нормативным нагрузкам $1,02 \div 1,05 \times 1,2 = 1,22 \div 1,26$, провода от действия ветровой нагрузки имеют запас прочности не менее 2-х (45% от предела прочности при растяжении), арматуры и изоляторов - не менее 2,5.

Такая ситуация имеет место практически на всех ВЛ, так как все остальные компоненты, кроме опор, проектируются как очень надежные (например, в районах с небольшим гололедообразованием с ограниченным среднеэксплуатационным тяжением в проводе, принятым для устранения проблем от вибрации). Это очень увеличивает вероятность выживания проводов по сравнению с опорами. Следовательно, провода в районах с малыми гололедообразованиями и защищенные от вибрационных повреждений надлежащим образом (например, кроме гасителей установлены протекторы в опасных сечениях) являются более надежными, чем другие компоненты.

Однако в районах с интенсивными гололедообразованиями ограничения по пределу выносимости не будут основными и провода станут менее надежными, чем опоры. Чтобы избежать каскадирования при разрушении элементов ВЛ, необходимо производить координацию прочности компонентов ВЛ. В таких случаях необходимо отказываться от проводов малых сечений.

Для решения проблем координации прочности элементов необходимо использовать следующие критерии:

- повреждение первого компонента должно вызывать наименьший эффект вторичного нагружения (динамического или статического) на другие компоненты, так как в таком случае возникнет каскадное разрушение;

- время и стоимость ремонта должны быть сведены до минимума и первый поврежденный компонент должен иметь отношение стоимости ущерба к стоимости восстановления повреждения около 1,0

- компонент низкой стоимости в сочетании с компонентом высокой стоимости должен проектироваться таким же прочным и надежным, как главный компонент. Исключением является случай, когда компонент специально спроектирован в качестве устройства, ограничивающего нагрузку. В этом случае, прочность его должна быть скоординирована с компонентом, который он защищает.

Таким образом, наиболее подходящая координация прочности будет следующей: повреждается первой промежуточная опора, не повреждаются анкерно-угловые опоры, провода, изоляторы, арматура.

Выведенные критерии явились результатом на основе логических рассуждений. На практике оказывается, что большинство существующих линий согласуются с предлагаемой координацией прочности. В тех случаях, когда не существует такая координация, такие линии менее надежные. Такая ситуация сложилась в начальной стадии применения распределительных сетей 6-10кВ, при которой недостаточно учитывалась координация прочности отдельных элементов. Провода малых сечений были менее прочны, чем опоры. И только после введения координации прочности эти линии стали достаточно надежными. Однако, могут существовать и другие ситуации, которые приведут к другой последовательности повреждения. Например, переходные опоры для больших переходов должны проектироваться на нагрузки, вызываемые поврежденными проводами. К сожалению, такая координация на Российских переходах не существует, что привело к серьезным проблемам при решении узла подвески проводов на промежуточных опорах.

В лавинных районах, где установка опор затруднена, провода являются слабейшими компонентами, и опоры в этом случае должны проектировать на возможные максимальные нагрузки, вызываемые поврежденными проводами, иначе повреждение проводов автоматически приводило бы к повреждению ближайших опор.

Что касается установления уровня надежности ВЛ и ее оценки то она сводится к следующей процедуре: для каждого вида климатической нагрузки устанавливается функция вероятности распределения прочности линии как системы и функцией вероятности возникновения нагрузок

Эта функция по своей сути сложная и может быть принята приближенно функцией распределения прочности слабейшего компонента. После чего определяется относительное положение этих двух функций.

Это относительное положение определяется периодом повторяемости $T =$ прочности с пределом исключения 10%. Выбор повторяемости периода t нагрузки зависит от желаемой степени надежности. Доказано, что данное положение ведет к постоянной надежности порядка $(1 - 1/2T)$ независимо от формы кривых функций нагрузки и прочности.

Надежность, полученная из приведенного выше соотношения, можно рассматривать, как надежность с минимальной величиной. При имеющихся точных исходных данных расчеты могут уточняться через введения коэффициентов коррекции относящихся к следующим пунктам:

- отражающие влияния неровности поверхности земли;
- использование компонентов, так как они не используются по своим максимальным параметрам, что дает рост надежности;
- отражающие координации прочности отдельных элементов ВЛ;
- отражающие качество изготовления элементов;
- отражающие соотношение между действительным пределом минимальной прочности и его нормативным значением.

Максимальная скорость ветра V_p определяется в зависимости от уровня надежности, на который будет проектироваться линия. Она должна определяться из среднего значения максимальных годовых скоростей ветра и стандарта отклонения статистического распределения скоростей, который определяется в соответствии с табл.1, где σ – стандарт отклонения, V – средняя скорость.

Таблица 1

Уровень надежности, период повторяемости	Максимальное значение / среднее значение скорости ветра		
	$\sigma = 0,12 V$	$\sigma = 0,16 V$	$\sigma = 0,20 V$
1 1 раз в 50 лет	1,30	1,41	1,52
2 1 раз в 150 лет	1,41	1,55	1,70
3 1 раз в 500 лет	1,52	1,70	1,87

Среднюю скорость ветра V можно определять по нормативным скоростям с повторяемостью 1 раз в 25 лет, приведенным в ПУЭ со следующими коэффициентами:

- при $\sigma = 0,12V$ отношение максимального значения к среднему с коэффициентом 1,22;
- при $\sigma = 0,16V$ – 1,3;
- при $\sigma = 0,20V$ – 1,38;

В Европе величина $\sigma = 0,12V$ установлена для нескольких стран. В условиях России в ее Европейской части можно принять такую же зависимость. В других местах эти значения должны уточняться по данным метеостанций. Региональные коэффициенты, коэффициенты по надежности и т. д. в таких случаях должны быть равны единице. Максимальные скорости ветра, действующие на провода (тросы), воспринимаемые опорами, будут определяться умножением на коэффициенты, приведенные в табл. 1

В случае отсутствия метеорологических данных, расчетные ветровые давления на провода, воспринимаемые опорами (P_w), определяются умножением на коэффициент надежности, приведенный в табл.2.

Таблица 2

Уровень надежности, период повторяемости	Максимальное значение/ среднее значение скорости ветра		
	$\sigma = 0,12 V$	$\sigma = 0,16 V$	$\sigma = 0,20 V$
1 1 раз в 50 лет	1,14	1,34	1,55
2 1 раз в 150 лет	1,18	1,42	1,71
3 1 раз в 500 лет	1,21	1,52	1,83

Вероятностный подход позволил четко установить риск превышения нагрузок и снизить его до приемлемого низкого уровня. При показанных логических рассуждениях, расчетные ветровые нагрузки на опоры меняются при детерминистическом характере учета нагрузок на опоры от 1,3 до 1,86 раза. При вероятностном методе от 1,14 до 1,83 раза - обеспечивается надежность экономически обоснованного уровня. Расчет дал различные уровни надежности в зависимости от важности линии в системе электроснабжения, не выходя за пределы значений коэффициентов, установленных ПУЭ, а в некоторых случаях, снижая их, что несомненно принесет определенный положительный эффект.

Вероятность возникновения гололедно-ветровых нагрузок определяется тремя переменными:

- ветер связанный с гололедными ситуациями,
- вес гололеда,
- форма гололеда.

Это совместное воздействие определяет величины поперечных и вертикальных нагрузок. Наилучшим подходом является прямое измерение этих нагрузок, но это не всегда возможно в практических условиях. Решение задачи путем экстраполяции на будущее приводят к неопределенности. Если рассматривать сочетание величины низкой вероятности в сочетании с величиной высокой вероятности других двух переменных, как показано в табл.3, то тогда можно рассматривать эти величины независимо друг от друга.

Таблица 3

Уровень вероятности	Уровень надежности	Период повторяемости	Вероятность превышения нагрузки
Низкий уровень вероятности максимальной величины одной переменной	1	50	65%
	2	150	30%
	3	500	10%
Высокий уровень вероятности. максимальной величины одной переменной	1	3	100%
	2		
	3		

Форму гололедообразования можно учитывать коэффициентом лобового сопротивления. Коэффициент перехода от нормативных гололедных нагрузок к расчетным в зависимости от коэффициента вариации гололедных нагрузок можно определять по табл.4

Таблица 4

Коэффициент вариации $r_{нп}/r$	$\gamma_{пв} \cdot \gamma_p \cdot \gamma_f$		
	Уровень надежности 1	Уровень надежности 2	Уровень надежности 3
0,2	1,52	1,70	1,87
0,3	1,78	2,04	2,32
0,4	2,04	2,38	2,46
0,5	2,30	2,73	3,20
0,6	2,56	3,07	3,64
0,7	2,81	3,42	4,08

Определение числа элементов воспринимающих максимальную нагрузку, имеет значение при определении объема разрушений при расчете экономических потерь, а также при определении вероятности нахождения в них слабого элемента. Анализ аварий показывает, что число опор, попадающих в зону нагрузок максимальной интенсивности, может находиться в пределах значений, приведенных в табл.5, где в числителе показано число опор, попадающих в зону действия максимальных нагрузок, а в знаменателе - число опор, воспринимающих нагрузку максимальной интенсивности.

Таблица 5

Нагрузки	Местность от равнины до холмистой	Горная местность
Максимальный порыв ветра	1 – 5 / 1	1– 2 / 1
Максимальный гололед	10-80 / 20	1- 10 / 2
Максимальный гололед + ветер	1 – 5 / 1	1 – 5 / 1

Как показал опыт эксплуатации проводов на ВЛ, они имеют недостаточный срок службы из-за износа от усталости. Для качественной оценки эффективности выполненной виброзащиты необходимо выполнять анализ величин изгибающих моментов в поперечном сечении провода у поддерживающего зажима, в зажиме гасителя вибрации, на входе в корпус соединительных и натяжных зажимов на всех собственных частотах провода. На основании полученных данных производится в опасных сечениях усиление провода протекторами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Основными климатическими нагрузками, оказывающими влияние на работу ВЛ, являются давление ветра на провода и опоры, масса и размеры гололедных отложений и температура воздуха действующие в различных сочетаниях. Согласно СНиП 2.01.07.-85, ГОСТ 27751-88 строительные конструкции должны быть запроектированы с достаточной надежностью (способностью сохранять заданные эксплуатационные качества в течение определенного срока службы), с учетом степени ответственности проектируемого объекта.

2. С целью повышения надежности проектируемых и эксплуатируемых линий электропередачи и снижения капитальных затрат при строительстве ВЛ необходимо совершенствовать подход к учету климатических нагрузок на основе вероятностного и полувероятностного подхода с учетом экономических составляющих при отказах

3. Время и стоимость ремонта при отказах должны быть сведены до минимума и первый поврежденный компонент должен иметь отношение стоимости ущерба к стоимости восстановления повреждения около 1,0.

4. Желательная схема учета нагрузок и прочности элементов ВЛ даны по тексту.