УДК 621.315.17

КОНЦЕПЦИИ РАЗВИТИЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НАПРЯЖЕНИЕМ 110–220 КВ В ГОЛОЛЁДНЫХ РАЙОНАХ

Шевченко Н.Ю., Лебедева Ю.В., Доронина О.И.

Камышинский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО «Волгоградский государственный технический университет», Камышин, e-mail: kti@kti.ru

В статье рассматриваются концепции развития воздушных линий электропередачи напряжением 110–220 кВ, работающих в сложных метеоусловиях. Первая концепция соответствует современному состоянию электросетей, когда основным способом борьбы с гололёдом является его плавка электрическим током. Проанализированы достоинства и недостатки данного подхода. На переходный период развития российской экономики предложена концепция развития воздушных линий электропередачи, позволяющая управлять надежностью экономическими методами, требующая совершенствования нормативно-правовой базы и внедрения современного высокотехнологичного оборудования. По предложенной концепции разработано четыре варианта развития воздушных линий электропередачи, напряжением 110 кВ. Построены зависимости полных тяжений в проводах при гололёдно-ветровой нагрузке. Методом Парето выбран оптимальный вариант.

Ключевые слова: воздушные линии электропередачи, концепции развития, плавка гололеда, надежность, экономичность, мониторинг

DEVELOPMENT CONCEPTS OF ELECTRICAL POWER LINES OF 110–220 KV VOLTAGE IN GLAZE ICE REGIONS

Shevchenko N.Y., Lebedeva Y.V., Doronina O.I.

Kamyshinsky Technological Institute (branch) FGBOU VPO «Volgograd State Technical University», Kamyshin, e-mail: kti@kti.ru

The paper is devoted to the justification of a development concept of 110–220 kV overhead power lines operating in adverse weather conditions. The first concept corresponds to the current state of electric systems when the main way to deal with icing is its fusion of electric shock. The advantages and disadvantages of this approach. During the transition period of the Russian economy, a concept of overhead power lines, allows you to manage the reliability of economic methods for improvement of the legal framework and the introduction of modern high-tech equipment. According to the proposed concept developed four versions of overhead power lines, 110 kV. Dependence of the total tension in the wires during sleet, wind load built. The best option is chosen by Pareto.

Keywords: overhead power lines, development concepts, ice melting, reliability, efficiency, monitoring

Развитие электрических сетей является одним из важнейших показателей уровня электроэнергетики. Наиболее ответственным и в то же время в большей степени уязвимым звеном электрической сети являются воздушные линии (ВЛ) электропередачи. Ухудшение технического состояния ВЛ в последние десятилетия является одной из основных причин роста их повреждаемости. Положение усугубляется воздействием гололёдно-ветровых нагрузок на все элементы воздушных линий электропередачи.

Износ воздушных линий электропередачи напряжением 110–500 кВ составляет примерно 60 %, а уровень отказов за последние сорок лет возрос примерно в два раза и обусловлен старением материалов и климатическими воздействиями (38 %) [7].

Для эффективной работы ВЛ необходима их модернизация и реконструкция, а дальнейшее развитие электросетевого хозяйства, связанное со строительством новых воздушных линий электропередачи, нуждается в выборе стратегии их развития.

Актуальность работы подтверждается потребностью в разработке концепций, которые могут стать основой для предупреждения или исключения аварий на воздушных линиях электропередачи в период экстремальных метеорологических воздействий.

Проектирование ВЛ следует проводить на базе системного подхода, учитывающего взаимосвязь технических и экономических параметров.

Разработка концепций

Основная задача при строительстве воздушных линий электропередачи – обеспечение надежности и экономической эффективности работы электрических сетей. Так как жизненный цикл развития воздушных линий состоит из трех составляющих: проектирование, монтаж и эксплуатация, то следует рассмотреть пути повышения надежности на этих трех этапах.

В качестве критерия надежности $K_н$ предложен комплексный показатель $N_{комп}$,

объединяющий надежность при эксплуатации $P_{эксп}$, проектировании $P_{проект}$ и механическую прочность ВЛ – $n_э$:

$$K_н = f(q_1 = P_{проек}; q_2 = P_{эксп}; q_3 = n_э) \to \max. \quad (1)$$

Проектная надежность воздушной линии с учетом принятых расчетных механических нагрузок на их элементы определяется по выражению:

$$P_{проект} = (1 - 1/T_i)^n, \quad (2)$$

где n – срок службы ВЛ, [лет],
T – период повторяемости, [лет].

Вероятность безотказной работы в течение года можно принять за надежность при эксплуатации:

$$P_{эксп} = e^{-\omega_j} \to \max, \quad (3)$$

где ω_j – параметр потока отказов для разных (j) вариантов повышения надежности ВЛ [1/год].

Механическая прочность проводов ВЛ оценивается эксплуатационным коэффициентом запаса прочности $n_э$, который показывает во сколько раз максимальная удельная нагрузка на провод меньше допустимой:

$$n_э = \frac{\gamma_в - \gamma_1}{\gamma_7 - \gamma_1} \quad (4)$$

где γ_1 и γ_7 – удельные нагрузки на провод от массы самого провода и массы провода покрытого гололедом с ветром соответственно, [Н/м·мм^2],
$\gamma_в$ – удельная нагрузка на провод при который он разрушается, [Н/м·мм^2].

Оптимальный уровень надежности достигается при минимальной сумме затрат $З_{ij}$ на комплекс мероприятий по увеличению надежности и покрытию ущерба

$$У_{t_{ij}} = У_{сист} + У_{потр},$$

где $У_{сист}$ – системный ущерб, $У_{потр}$ – ущерб от аварийных ограничений потребителя электроэнергии.

$$З_{ij} = \sum_{t=1}^{T_{расч}} [И_{эji} + Ц_{диф\,ij} \cdot \delta \cdot (\Delta W_{нj} + \Delta W_{xxj} + \Delta W_{плав.гол.j}) + У_{tij}] \times \alpha_д \to \min, \quad (5)$$

где i – уровень надежности,
$И_{эij}$ – издержки на эксплуатацию, [тыс. руб.],
$Ц_{диф.ij}$ – дифференцированный тариф, [руб./кВт·ч],
$\delta = \Delta З/\Delta H_n$ – коэффициент коррекции тарифа,
$\Delta З$ – приращение удельных эксплуатационных затрат у поставщика, [тыс.руб./ кВт·ч],
ΔH_n – приращение удельных значений недополученной прибыли у потребителя, [тыс. руб./ кВт·ч], при $\delta > 1$ – надбавка к тарифу, $\delta < 1$ – скидка, $\delta = 1$ – тариф неизменный;
$\Delta W_{нj}$, ΔW_{xxj} – нагрузочные потери электроэнергии и потери холостого хода, [кВт·ч/год];
$\Delta W_{плав.гол.j}$ – потери электроэнергии на плавку гололеда, [кВт·ч/год[;
E – норма дисконтирования;
$\alpha_д = 1/(1 + E)^t$ – коэффициент дисконтирования;
$T_{расч}$ – горизонт расчета, [лет].

В качестве критерия экономичности $K_э$ можно предложить чистый дисконтированный доход:

$$К_э = NPV = \left(\sum_{t=1}^{T_{расч}} \sum_{j=1}^{m} R_{tij} - З_{ti}\right) \cdot \alpha_д - \sum_{t=1}^{T_{расч}} \sum_{j=1}^{m} К_{t_{ij}} \cdot c_к \cdot \alpha_д \to \max, \quad (6)$$

где NPV – чистый дисконтированный доход, [тыс. руб.];
R_{ij} – доход, достигаемый на t-м шаге расчета, [тыс. руб.];
$З_{tj}$ – затраты, осуществляемые на t-том шаге с учетом ущерба от недоотпуска электроэнергии, [тыс. руб.];
$\alpha_д$ – коэффициент дисконтирования;
K_{tij} – капитальные вложения в j-вариант развития ВЛ, [тыс. руб.];
$c_к$ – поправочный коэффициент удорожания капиталовложений;
i – уровень надежности ВЛ.

Выбор оптимального варианта развития воздушных линий электропередачи можно произвести методам Парето.

Для вновь проектируемых и создаваемых воздушных линий электропередачи можно выделить два подхода развития ВЛ, работающих в сложных метеорологических условиях.

Первая концепция – характерна для стран с переходной экономикой, где экономические особенности не позволяют иметь механически надежные конструктивные элементы ВЛ, способные противостоять гололёдно-ветровым нагрузкам без применения плавки гололеда.

Существующие в России нормативные документы предусматривают менее жесткие требования в обеспечении надежности, чем в энергообъединениях США и Европы. В то же время в энергосистемах России предусмотрено более широкое использование средств противоаварийного управления.

Основа правового обеспечения надежности в электроэнергетике заложена

в Гражданском кодексе РФ и Федеральном законе «Об электроэнергетике». В соответствии с Гражданским Кодексом РФ энергоснабжающая организация должна подавать потребителю электроэнергию через присоединенную сеть в количестве, предусмотренным договором и с соблюдением режима подачи, согласованного сторонами. При этом уровень надежности электроснабжения жестко и конкретно не устанавливается. Число и длительность отключений как основных показателей надежности, определяют электроснабжающая организация и потребитель в совместном договоре. Гражданский кодекс РФ регламентирует качество подаваемой энергии соответственно требованиям, установленным «Государственными стандартами и иными обязательными правилами». В России действуют «Требования к качеству электрической энергии в электрических сетях общего назначения» (ГОСТ Р54149-2010), в которых, однако, не отражены требования потребителей по надежности электроснабжения, в частности по числу перерывов. В «Правилах устройства электроустановок» (ПУЭ-7) определен и нормирован показатель надежности – время отключений ($T_{откл}$). Но число перерывов не нормируется. Поэтому такая норма в современных рыночных отношениях не отражает интересов сторон. Нормирование отказов возможно только на основе использования статистики отказов, характерных для действующих сетей.

Отмеченное позволяет сделать вывод, что существующая в России нормативно-правовая база не приспособлена для введения в действие экономического механизма управления надежностью электроснабжения потребителей при заключении договоров [2].

В целях повышения проектной надежности ВЛ в Правилах устройств электроустановок седьмого издания (ПУЭ-7) увеличен период повторяемости нормативных нагрузок до 25 лет, изменен метод определения расчетных климатических нагрузок. Пересмотрены карты районирования по гололеду и силе ветра. В нашей стране и за рубежом ведутся интенсивные разработки по высокотехнологическим материалам и конструкциям опор, проводов, изоляторов.

Основные особенности первой концепции развития воздушных линий электропередачи:

– основным способом борьбы с гололедом является плавка гололеда.

Плавка гололеда негативно влияет на экологию окружающей среды и повышает себестоимость передачи электроэнергии в зимний период за счет увеличения потерь электроэнергии ($\Delta W_{плав.гол.j}$) [4].

– Период определения расчетных нагрузок, равный T = 25 годам не связан со сроком службы основного оборудования, поэтому не отражает истинного уровня надежности.

– Из-за несовершенства правовой базы нет возможности регулировать надежность экономическими методами. Не учитывается уровень надежности потребителей различных категорий. Нормативными документами не регламентируется число отключений и длительность перерывов. Не утверждена удельная стоимость компенсаций от ущербов; отсутствуют дифференцированные по уровню надежности тарифы на электроэнергию, следовательно, нет стимулирования инвестиций в повышение надежности.

– Отсутствуют базы данных для мониторинга показателей, как системной надежности, так и надежности электроснабжения конечных потребителей.

– Все усилия направлены на совершенствование систем плавки гололеда [7].

Вторая концепция – предполагает компромисс между затратами на создание линии и издержками на её эксплуатацию. Механическая прочность воздушных линий электропередачи и её элементов закладывается выше, чем в первой концепции, но и необходимость в плавке гололеда в процессе эксплуатации возникает реже.

Главные задачи: повышение сроков службы и надежности оборудования ВЛ, снижение сроков строительства и затрат на её эксплуатацию.

Основные особенности второй концепции развития ВЛ:

– в целях повышения проектной надежности ВЛ необходимо согласовать период повторяемости нормативных нагрузок со сроком службы опор. Можно предложить периоды повторяемости, представленные в таблице. При длине ВЛ больше 100 км период повторяемости климатических нагрузок должен быть увеличен пропорционально длине ВЛ.

– Для разных категорий потребителей необходимо утвердить нормируемое количество перерывов в электроснабжении.

– Разработать дифференцированные тарифы для потребителей разной категории надежности [3].

– Для подсчета ущербов от перерыва в электроснабжении необходимо разработать дифференцированную удельную стоимость ущерба перерыва электроснабжения.

Необходимо установление оптимальных расчетных и нерасчетных (включая форс-мажор) условий, степени ответственности субъектов в зависимости от этих условий, а также механизмов компенсации ущербов

через систему страхования. Важнейшим инструментом реализации экономического и нормативного управления надежностью должна послужить система договорных отношений. Поставщики и потребители строят свои отношения на договорной основе. Оценка затрат позволяет обосновать отпускную стоимость электроэнергии при установленном в договоре уровне надежности, а оценка ущерба – точку отсчета для определения размера штрафа. Правильно установленный уровень надежности минимизирует убытки, как поставщика, так и потребителя электроэнергии [2].

– Механическая прочность ВЛ увеличивается за счет применения высокотехнологичного оборудования, способного противостоять гололёдно-ветровым ситуациям: многогранных металлических опор; специальных проводов и молниезащитных тросов, неподверженных обледенению (провод марки AERO-Z), высокотемпературных проводов (GTACSR, TACSR ACS и другие), муфт Кюри, внутрифазовых распорок (демпферов), междуфазовых изолирующих распорок, полимерных кремнийорганических изоляторов, специальных конструкций линейной арматуры повышенной износостойкости, кольцевой защиты из полимерных материалов и т.п.

Применение средств ограничения колебаний проводов (ограничители вибрации проводов и грозозащитных тросов типа эксцентричных грузов и грузов маятникового типа и т.п.).

Отказ от грозотросов (установка ограничителей перенапряжений или длинноискровых разрядников).

– Уменьшение вдвое длины пролетов путем подстановки дополнительных опор на участках ВЛ подверженным большим гололёдно-ветровым нагрузкам.

Усовершенствование эксплуатации ВЛ:

– в период эксплуатации может частично применяться плавка гололёда, как дополнительное средство повышения надежности работы ВЛ;

– внедрение в электрических сетях автоматизированной информационной системы наблюдения за гололедом (оснащение линий мониторингами, работающими в режиме реального времени; применение термодинамического способа мониторинга) [9, 8];

– своевременного выполнения режимных мероприятий, позволяющих поддерживать температуру проводов на уровне, не допускающим налипание гололеда;

– совершенствование схем плавки гололеда.

Данная концепция предлагается в качестве основной в переходный период Российской экономики.

Разработка вариантов развития ВЛ

По предложенной концепции разработано четыре варианта развития воздушных линий электропередачи, напряжением 110 кВ.

1 вариант. Подвеска провода марки AERO-Z 301-2Z на железобетонные опоры типа ПБ 110-5 ЖБ.

2 вариант. Провод марки GTACSR 240/40 (провод с зазором), железобетонные опоры типа ПБ 110-5 ЖБ. В период гололедообразования предусматривается увеличение токовой нагрузки за счет схемных мероприятий.

3 вариант. Провод марки TACSR ACS 240/40, металлические решетчатые опоры типа П-110-5 МР и уменьшение промежуточного пролета на 30 %.

4 вариант. Провод марки АС 240/39, металлические многогранные опоры типа ПС35/110ПУ-9, промежуточный пролет между опорами уменьшен в два раза.

Период повторяемости принят T = 35 лет.

Построены зависимости полных тяжений в проводах при гололедно-ветровой нагрузке (рисунок).

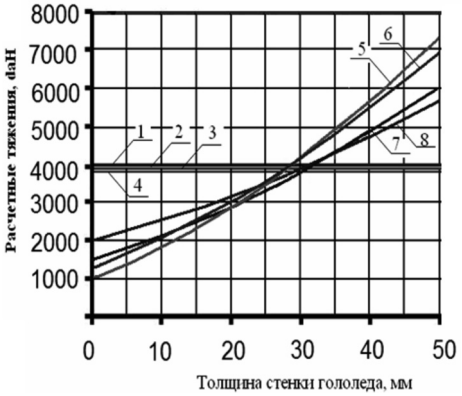
Сравнительный анализ результатов расчетов, показал:

1. При замене провода АС на провод AERO-Z капиталовложения увеличиваются в 2,19 раз, при этом надежность работы линии увеличивается в 3,08 раза.

2. При замене провода АС на повод GTACSR капиталовложения увеличиваются 1,33 раза, надежность в 2,17 раза.

Рекомендуемые периоды повторяемости для второй концепции

i-уровень надежности	Период повторяемости T, [лет]	Вероятность непревышения климатических нагрузок, P	Срок службы ВЛ, n, [лет]	Напряжение ВЛ, [кВ]	Надежность принятых расч. нагрузок $P_{проек}$
1	25	0,96	50	110	0,13
2	35	0,97	50	220	0,235
3	50	0,98	50	330 и выше	0,36



1 – $T_{доп}$ (TACSR 240/40);
2 – $T_{доп}$ (GTACSR 240/40);
3 – $T_{доп}$ (AERO-Z 301-2Z);
4 – $T_{доп}$ (AC 240/40);
5 – $T_{в.г.}$ (GTACSR 240/40);
6 – $T_{в.г.}$ (TACSR 240/40);
7 – $T_{в.г.}$ (AC 240/40);
8 – $T_{в.г.}$ (AERO-Z 301-2Z)

Полные тяжения в проводах при чистом гололёде с плотностью 900 кг/м³ и воздействии ветра со скоростью υ = 8 м/с

3. При замене железобетонных опор на металлические решетчатые опоры, сокращении пролетного расстояния на 30 % и замене провода АС на TACSR капиталовложения увеличиваются 3,38 раза, а надежность увеличивается 2,25 раза.

4. При замене железобетонных опор на многогранные металлически и сокращении пролетного расстояния в два раза капиталовложения увеличиваются 1,19 раза, надежность в 3,17 раза.

Практическая ценность работы

1. Предложена альтернативная концепция построения воздушных линий электропередачи, позволяющая повысить эффективность инвестиций в строительство ВЛ, работающих в сложных метеорологических условиях.

Выводы

1. Основные причины снижения надежности работы электрических ВЛ: старение оборудования и влияние экстремальных метеорологических условий.

2. На переходный период развития российской экономики предложена концепция развития ВЛ, позволяющая управлять надежностью экономическими методами, требующая совершенствования нормативно-правовой базы и внедрения современного высокотехнологичного оборудования.

Список литературы

1. Ахмедова О.О., Сошинов А.Г.Analysis of Ice Melting System // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Vol. 698 (2015). – С. 710–715.

2. Березнев Ю.И. О проблеме обеспечения надежности электроснабжения // Энергетик. – 2007. – № 10. – С. 24–25.

3. Внедрение автоматизированной системы наблюдения за гололедом в Камышинских электрических сетях / Шевченко Н.Ю., Лебедева Ю.В., Хромов Н.П., Сошинов А.Г. // Современные проблемы науки и образования. – 2009. – № 5 – С. 127–132.

4. Диагностика, реконструкция и эксплутация воздушных линий электропередачи в гололедных районах: учеб. пос. / И.И. Левченко, А.С. Засыпкин, А.А. Аллилуев, Е.И. Сацук.– М.: Издательский дом МЭИ, 2007.– 448 с.

5. Мероприятия по снижению гололёдно-ветровых аварий в электрических сетях / М.В. Панасенко, Н.Ю. Шевченко, Н.П. Хромов, А.Г. Сошинов // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2014. – № 8. – С. 30–37.

6. Мониторинг интенсивности гололёдообразования на воздушных линиях электропередачи и в контактных сетях / Д.Е. Титов, Г.Г. Угаров, А.Г. Сошинов // Электрические станции. – 2014. – № 11. – С. 42–46.

7. Повышение эффективности воздушных линий электропередачи напряжением 110–220 кВ в гололедных районах. Монография / Г.Г. Угаров, Н.Ю. Шевченко, Ю.В. Лебедева, А.Г. Сошинов. – М.: Перо, 2013. – 187 с.

8. Совершенствование системы тарифообразования на электрическую энергию / Н.В. Гусева, Н.Ю. Шевченко, А.Г. Сошинов, Ю.В. Лебедева // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2010. – № 5, ч. 1. – С. 277–280.

9. Термодинамический способ мониторинга гололёдных отложений на проводах / Д.Е. Титов // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2014. – № 4. – С. 37–44.