

Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Владимирский государственный университет
Кафедра электротехники и электроэнергетики

Методические указания к расчетно-графическим
работам по дисциплине «Воздушные и кабельные линии».
Методы расчетов конструктивной части воздушных
линий электропередачи

Составители
Г.К. ЗАРУДСКИЙ
А.В. КОРОВКИН
С.А. СБИТНЕВ

Владимир 2006

УДК 621.315
ББК 31.27
М54

Рецензент

Доцент кафедры приборостроения и информационно-измерительной техники
Владимирского государственного университета
А.А. Козлов

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Владимирского государственного университета

Методические указания к расчетно-графическим работам по
М54 дисциплине «Воздушные и кабельные линии». Методы расчетов
конструктивной части воздушных линий электропередачи / сост. :
Г. К. Зарудский, А. В. Коровкин, С. А. Сбитнев ; Владим. гос. ун-т. –
Владимир : Изд-во Владим. гос. ун-та, 2006. – 32 с.

Содержат указания к выполнению заданий по одной из дисциплин специализации «Воздушные и кабельные линии».

Рассматриваются следующие расчетно-графические работы: выбор определяющего нормативного сочетания климатических условий в расчетах проводов ВЛ на механическую прочность, расчеты проводов в анкерном участке с отличающимися длинами пролетов в нормальном режиме работы ВЛ, основные понятия методики расчетов опор и фундаментов по предельным состояниям, воздействие ВЛ на окружающую среду.

Предназначены для студентов электротехнических специальностей и могут быть полезны инженерам-энергетикам, занятым в области электроснабжения и распределения электрической энергии.

Библиогр.: 9 назв.

УДК 621.315
ББК 31.27

ВВЕДЕНИЕ

Расчетно-графические задания, представленные в данных методических указаниях – часть обязательной программы по подготовке инженеров специальности 100400 – электроснабжение по дисциплине «Воздушные и кабельные линии».

В соответствии с лекционными курсами расчетно-графические задания содержат расчеты конструктивной части ВЛ электропередачи и их взаимодействие с окружающей средой.

Расчетно-графические работы должны выполняться на листах бумаги формата А4.

Выполнение расчетно-графической работы предусматривает проведение студентами четырехчасовой подготовительной работы.

При оформлении расчетно-графических работ студент должен придерживаться следующих правил.

1. Условия задачи необходимо переписать полностью со всеми необходимыми рисунками и числовыми данными для своего варианта. Пропуски и сокращения не допускаются.

2. При применении формул следует приводить описания всех переменных, входящих в данную формулу; числовые значения постоянных, присутствующих в формулах и выражениях, также должны приводиться в тексте пояснительной записки.

3. Пояснительная записка должна содержать достаточно подробные описания всех этапов расчета, кроме того, необходимо проводить все основные этапы вычислений.

4. В тексте пояснительной записки все физические величины должны быть представлены в единицах системы СИ.

В графическую часть пояснительной записки должны входить графики и рисунки, полученные в результате выполнения расчетно-графической работы. Все графические построения необходимо выполнять на клетчатой бумаге с указанием размерностей физических величин и масштабов.

1. ВЫБОР ОПРЕДЕЛЯЮЩЕГО НОРМАТИВНОГО СОЧЕТАНИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ В РАСЧЕТАХ ПРОВОДОВ ВЛ НА МЕХАНИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ

Действующими Правилами устройства электроустановок (ПУЭ, 7-е издание) предусматривается проведение расчетов проводов ВЛ на механическую прочность по методу допускаемых напряжений. При этом для каждой марки провода назначаются три значения допускаемого напряжения соответственно для трех возможных наиболее тяжелых режимов работы, отличающихся величинами внешних воздействий (давление ветра, гололедные отложения, температура) и несовпадающих по времени года.

Вероятность возникновения каждого из этих режимов неодинакова. Так, первый режим (или состояние) при средней годовой температуре воздуха наблюдается ежегодно весной и осенью и считается длительным, хотя может быть прерывистым по времени. Второй режим при наибольших внешних нагрузках возникает с вероятностью, определяемой статистической повторяемостью наибольших механических нагрузок от ветра и гололеда. Эта повторяемость и величины наибольших нагрузок являются различными для разных географических районов и местностей сооружения воздушных линий. Поэтому упомянутый режим может возникать один раз в течение ряда лет (25 [ПУЭ]), хотя заранее и нельзя предугадать в какой именно год после введения линии в эксплуатацию. Третий режим наименьшей температуры следует расценивать как маловероятный, поскольку такая температура, когда-либо зафиксированная метеостанцией в конкретной местности, является выбросом случайного процесса изменения температуры за длительный период наблюдения.

Три значения допускаемого напряжения, применяемые в расчетах провода (троса) заданной марки, определяются видом напряженного состояния, испытываемого металлами (или сплавами металлов) проволоки провода, его эквивалентными механическими характеристиками и назначаемыми на основании опыта эксплуатации коэффициентами запаса прочности. В режимах наибольших нагрузок и наименьшей температуры провод работает на растяжение, поэтому допускаемые напряжения вычисляются по пределу прочности провода растяжению.

В режиме же среднегодовой температуры провод не получает сильного растяжения, но может подвергнуться разрушению из-за высокочас-

тотных длительных автоколебаний (вибрация), когда проволоки провода при перегибах работают на усталость, при этом величина допускаемого напряжения рассчитывается по пределу усталостной прочности. Для проволок из электротехнического алюминия и сплавов на его основе (алдрей, альмелек, АВ-Е) предел усталости составляет около 60 % от предела прочности при растяжении проволок. Следовательно, допускаемое напряжение для режима средней годовой температуры является наименьшим среди трех упомянутых.

Означает ли это, что именно режим средней годовой температуры, учитывая к тому же его частую повторяемость и общую значительную длительность, во всех случаях должен рассматриваться как основной (определяющий) расчетный режим? Ответ на этот вопрос даёт нижеследующее рассуждение.

Проанализируем два уравнения состояния провода, в которых заданными (исходными) условиями являются параметры режима средней годовой температуры (СЭ-условия). Искомыми будем считать напряжения в проводах соответственно в режиме наибольших нагрузок и режиме наименьшей температуры:

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{нб}} - (\gamma_{\text{нб}} \ell / \sigma_{\text{нб}})^2 (E/24) &= [\sigma]_{\text{сэ}} - (\gamma_1 \ell / [\sigma]_{\text{сэ}})^2 (E/24) + \alpha E (\Theta_{\text{сг}} - \Theta_{\text{г}}), \\ \sigma_{(-)} - (\gamma_1 \ell / \sigma_{(-)})^2 (E/24) &= [\sigma]_{\text{сэ}} - (\gamma_1 \ell / [\sigma]_{\text{сэ}})^2 (E/24) + \alpha E (\Theta_{\text{сг}} - \Theta_{(-)}),\end{aligned}$$

где $\sigma_{\text{нб}}$ – значение фактического эквивалентного напряжения, при наибольшей механической нагрузке $\gamma_{\text{нб}}$;

l – длина пролета;

E – модуль упругости;

$[\sigma]_{\text{сэ}}$ – напряжение проводов при среднегодовой температуре $\Theta_{\text{сэ}}$;

$\Theta_{\text{г}}$ – температура образования гололеда;

$\sigma_{(-)}$ – напряжение проводов при наименьшей температуре $\Theta_{(-)}$.

Рассматривая очень короткие ($\ell \rightarrow 0$) и достаточно длинные ($\ell \rightarrow \infty$) анкерные пролеты, получаем "вырожденные" уравнения состояния:

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{нб}}^{(0)} &= [\sigma]_{\text{сэ}} + \alpha E (\Theta_{\text{сг}} - \Theta_{\text{г}}); & \sigma_{\text{нб}}^{(\infty)} &= [\sigma]_{\text{сэ}} \gamma_{\text{нб}} / \gamma_1; \\ \sigma_{(-)}^{(0)} &= [\sigma]_{\text{сэ}} + \alpha E (\Theta_{\text{сг}} - \Theta_{(-)}); & \sigma_{(-)}^{(\infty)} &= [\sigma]_{\text{сэ}}.\end{aligned}$$

Из последнего равенства с очевидностью следует, что при длинных пролетах режим наименьшей температуры опасности не представляет и поэтому не является расчётным. Из анализа остальных соотношений получим результаты, используя конкретные значения допускаемых напряжений и эквивалентных механических характеристик.

Согласно ПУЭ (табл. 2.5.7 и 2.5.8),

$$[\sigma]_{(-)} = [\sigma]_{\text{нб}}; [\sigma]_{\text{нб}}/[\sigma]_{\text{сэ}} = 1,5; [\sigma]_{\text{нб}} - [\sigma]_{\text{сэ}} = 42 - 51 \text{ Н/мм}^2;$$

$\alpha E = 1,525 - 1,629$ для сталеалюминиевых проводов наиболее употребляемых конструкций с соотношением значений поперечных сечений алюминия и стали от 4,3 до 8,0.

Получается, что при длинных пролетах в режиме наибольших нагрузок напряжение в проводе может превысить свое допускаемое значение, если отношение $\gamma_{\text{нб}}/\gamma_1 > 1,5$. Последнее является вполне реальным.

Если же рассматривать короткие пролеты, то

$$\Theta_{\text{сг}} - \Theta_{\text{г}} = \{[\sigma]_{\text{нб}} - [\sigma]_{\text{сэ}}\}/(\alpha E) = (27 - 31)^\circ\text{C}$$

$$\Theta_{\text{сг}} - \Theta_{(-)} = \{[\sigma]_{(-)} - [\sigma]_{\text{сэ}}\}/(\alpha E) = (27 - 31)^\circ\text{C}$$

Поскольку температура гололедообразования $\Theta_{\text{г}}$ обычно принимается -5°C (реже -10°C), а среднегодовые температуры на территории России не превышают $+15^\circ\text{C}$, можно сделать однозначный вывод, что в режиме наибольшей нагрузки напряжение не может превысить допускаемые значения и поэтому для коротких пролетов упомянутый режим ($\gamma_{\text{нб}}$) не является расчетным.

Разность температур $\Theta_{\text{сг}} - \Theta_{(-)}$ вполне может превышать $(27 - 31)^\circ\text{C}$ для многих географических районов страны, вследствие чего в режиме наиминимальной температуры будет происходить превышение допускаемого напряжения, однако, с малой вероятностью (см. выше).

Таким образом, можно заключить, что для коротких пролетов определяющим расчетным режимом обычно будет выступать режим наиминимальной температуры, но не режим наибольших нагрузок, а для длинных пролетов, наоборот – режим наибольших нагрузок, но не режим наиминимальной температуры.

Для пролетов среднего размера в зависимости от конкретных условий, по-видимому, каждый из трех режимов работы может проявить себя определяющим.

Хотя в каждом конкретном случае вполне допустимо поочередное рассмотрение каждого из трех интересующих режимов с целью выявления определяющего, менее трудоемким и более наглядным является подход, основанный на решении трех уравнений состояния провода относительно

длины пролета и вычислении размеров так называемых "критических" пролетов. Считая исходными (известными) параметры при климатических условиях "m", а искомыми - параметры при условиях "n", имеем уравнение состояния провода в общей форме записи:

$$\sigma_n - (\gamma_n \ell / \sigma_n)^2 (E/24) = \sigma_m - (\gamma_m \ell / \sigma_m)^2 (E/24) + \alpha E (\Theta_m - \Theta_n).$$

Его решение относительно длины анкерного пролета определяется формулой

$$\ell = 4,9 (\sigma_n / \gamma_m) \sqrt{\frac{\sigma_n - \sigma_m + \alpha E (\Theta_n - \Theta_m)}{[(\gamma_n / \gamma_m)^2 - (\sigma_n / \sigma_m)^2] E}}.$$

При поочередной подстановке в эту формулу значений параметров, соответствующих любым двум нормативным сочетаниям климатических условий и допускаемых напряжений из трех возможных, получим формулы для расчета значений трех критических пролетов.

Определение. Критическим пролетом называется такой, при котором для каждого из двух возможных нормативных сочетаний климатических условий изменяющееся во времени напряжение в проводе оказывается равным соответствующим двум допускаемым значениям, но в разные сезоны или даже годы эксплуатации.

Первый критический пролет: "n" – режим наиминимальной температуры, "m" – режим средней годовой температуры (средние эксплуатационные условия)

$$\ell_{кр1} = 4,9 \frac{[\sigma]_{(-)}}{\gamma_1} \sqrt{\frac{[\sigma]_{(-)} - [\sigma]_{СЭ} + \alpha E (\Theta_{(-)} - \Theta_{СГ})}{(1 - [\sigma]_{(-)}^2 / [\sigma]_{СЭ}^2) E}}.$$

Второй критический пролет: "n" – режим наибольшей механической нагрузки, "m" – режим наиминимальной температуры

$$\ell_{кр2} = 4,9 \frac{[\sigma]_{НБ}}{\gamma_1} \sqrt{\frac{[\sigma]_{НБ} - [\sigma]_{(-)} + \alpha E (\Theta_{Г} - \Theta_{(-)})}{(\gamma_{НБ}^2 / \gamma_1^2 - [\sigma]_{НБ}^2 / [\sigma]_{(-)}^2) E}}.$$

Третий критический пролет: "n" – режим наибольшей механической нагрузки, "m" – режим средних эксплуатационных условий

$$\ell_{кр3} = 4,9 \frac{[\sigma]_{НБ}}{\gamma_1} \sqrt{\frac{[\sigma]_{НБ} - [\sigma]_{СЭ} + \alpha E (\Theta_{Г} - \Theta_{СГ})}{(\gamma_{НБ}^2 / \gamma_1^2 - [\sigma]_{НБ}^2 / [\sigma]_{СЭ}^2) E}}.$$

Вычисления критических пролетов могут приводить как к действительным, так и мнимым результатам (отрицательные числа под корнем), а также давать нулевые решения. К примеру, при равенстве температур гололедообразования и наимизшей (для очень теплых географических районов, исключая Россию) $\ell_{кр2} = 0$. Кроме того, возможно получение различных соотношений между действительными значениями, как-то:

$$\ell_{кр1} < \ell_{кр2} < \ell_{кр3} \text{ или } \ell_{кр1} > \ell_{кр2} > \ell_{кр3}.$$

Имея в виду цель – выявление определяющего расчетного режима, целесообразно для наглядности рассчитать и построить зависимости изменения напряжения при средних эксплуатационных условиях, если принимать длину анкерного пролета переменной.

Эти зависимости рассчитываются с использованием двух уравнений состояния:

$$\sigma_{сэ} - (\gamma_1 \ell / \sigma_{сэ})^2 (E/24) = [\sigma]_{нб} - (\gamma_{нб} \ell / [\sigma]_{нб})^2 (E/24) + \alpha E (\Theta_{г} - \Theta_{сг}); \quad (1)$$

$$\sigma_{сэ} - (\gamma_1 \ell / \sigma_{сэ})^2 (E/24) = [\sigma]_{(-)} - (\gamma_1 \ell / [\sigma]_{(-)})^2 (E/24) + \alpha E (\Theta_{(-)} - \Theta_{сг}). \quad (2)$$

Приведенные уравнения отличаются двумя последними слагаемыми правых частей.

Расчетные значения напряжения $\sigma_{сэ}$ при варьировании ℓ в пределах от 0 до ∞ могут быть как меньше, так и больше допустимого $[\sigma]_{сэ}$, соответственно этому графические зависимости будут пересекаться с горизонтальной прямой, имеющей ординату $\sigma_{сэ} = [\sigma]_{сэ}$ (см. рис. 1). Точки пересечения двух кривых, обозначенных (1) и (2), между собой и с прямой имеют абсциссы, являющиеся значениями критических пролетов.

Критические пролеты разграничивают диапазоны (интервалы) возможных размеров анкерных и промежуточных пролетов проектируемых воздушных линий, внутри которых одно из трех нормативных сочетаний климатических условий работы становится определяющим в расчете провода (или грозозащитного троса) на механическую прочность. Выбор определяющего сочетания (режима работы) производится сравнением известных (по данным статистики многочисленных ранее выполненных проектов ВЛ) величин пролетов с критическими. При этом руководствуются правилом "наименьших ординат" (см. штриховки и обозначения определяющих режимов на рис. 1).

Взаимное расположение графических зависимостей и прямой линии, наличие всех трех или меньшего числа точек их пересечения определяются

конкретными значениями и соотношениями удельных нагрузок, температур и допускаемых напряжений.

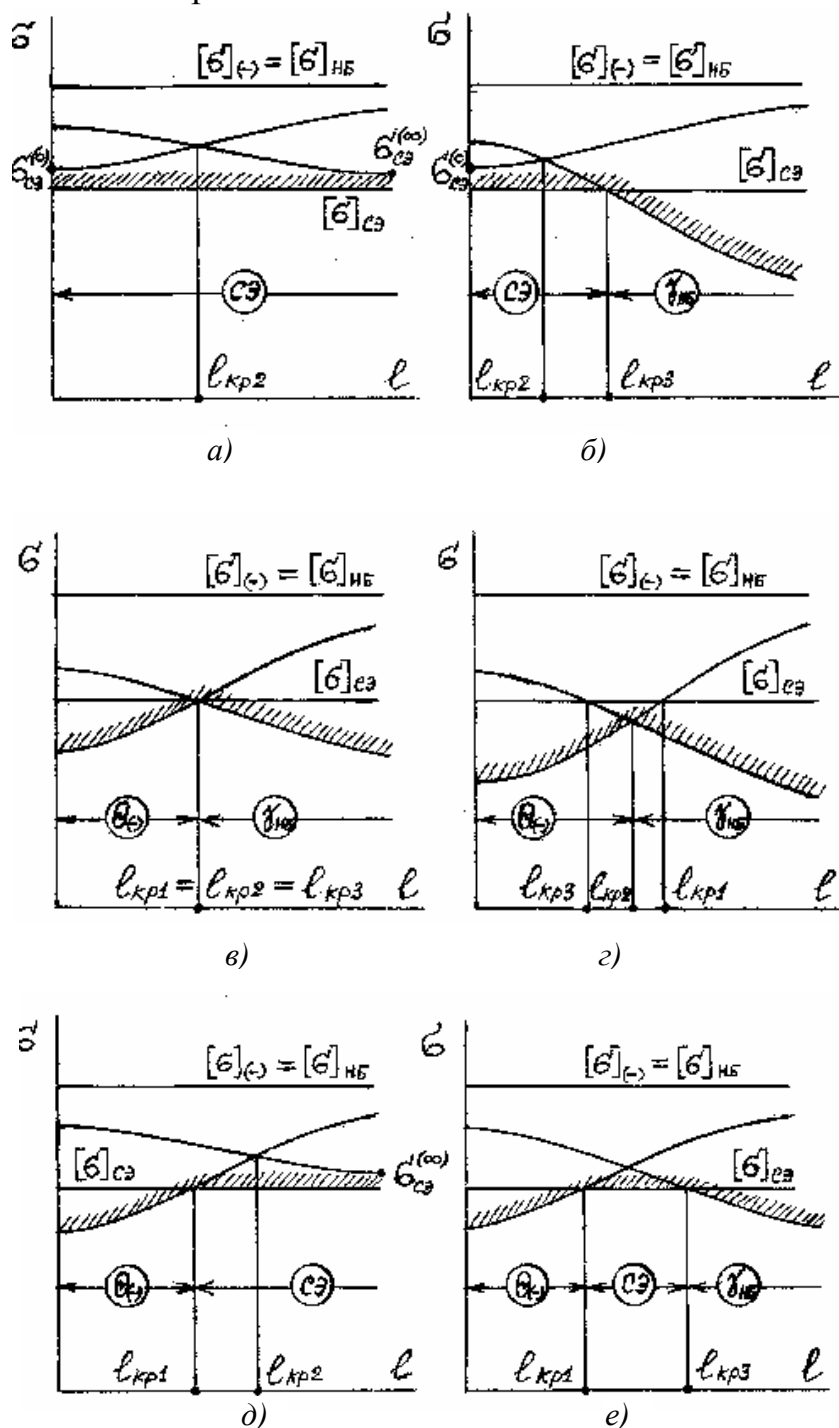


Рис. 1. Графики зависимости напряжений от длины анкерного пролета

Возможные случаи выбора, определяющего нормативного сочетания климатических условий, представлены на рис. 1, а – е.

Отсутствие пересечения кривой и горизонтальной прямой по своему смыслу соответствует мнимому значению критического пролета. Свойство искомого значения $l_{кр}$ можно выяснить достаточно просто, если вычислять его только тогда, когда оно является действительным. В частности, из уравнения состояния (2) следует, что при $l \rightarrow 0$

$$\sigma_{сэ}^{(0)} = [\sigma]_{(-)} + \alpha E (\Theta_{(-)} - \Theta_{сг}).$$

Если окажется, что $\sigma_{сэ}^{(0)} > [\sigma]_{сэ}$, то значение $l_{кр1}$ – мнимое (пересечения нет), и оно не вычисляется (см. рис. 1, а и 1, б). Из уравнения (1) при $l \rightarrow \infty$

$$\sigma_{сэ}^{(\infty)} = [\sigma]_{нб} \gamma_1 / \gamma_{нб}.$$

Мнимое значение $l_{кр3}$ будет при $\sigma_{сэ}^{(\infty)} > [\sigma]_{сэ}$ (см. рис. 1, а и 1, д). Второй критический пролет в большинстве рассматриваемых случаев принимает действительное значение, но его вычисление требуется лишь в тех случаях, когда $l_{кр1} > l_{кр2} > l_{кр3}$ (см. рис. 1, з).

Логическая блок-схема выбора определяющего расчетного режима приведена на рис. 2, где $l_{пр}$ – приведенный пролет. Она может быть применена для разработки ПЭВМ-программы расчета проводов ВЛ (грозозащитных тросов) на механическую прочность.

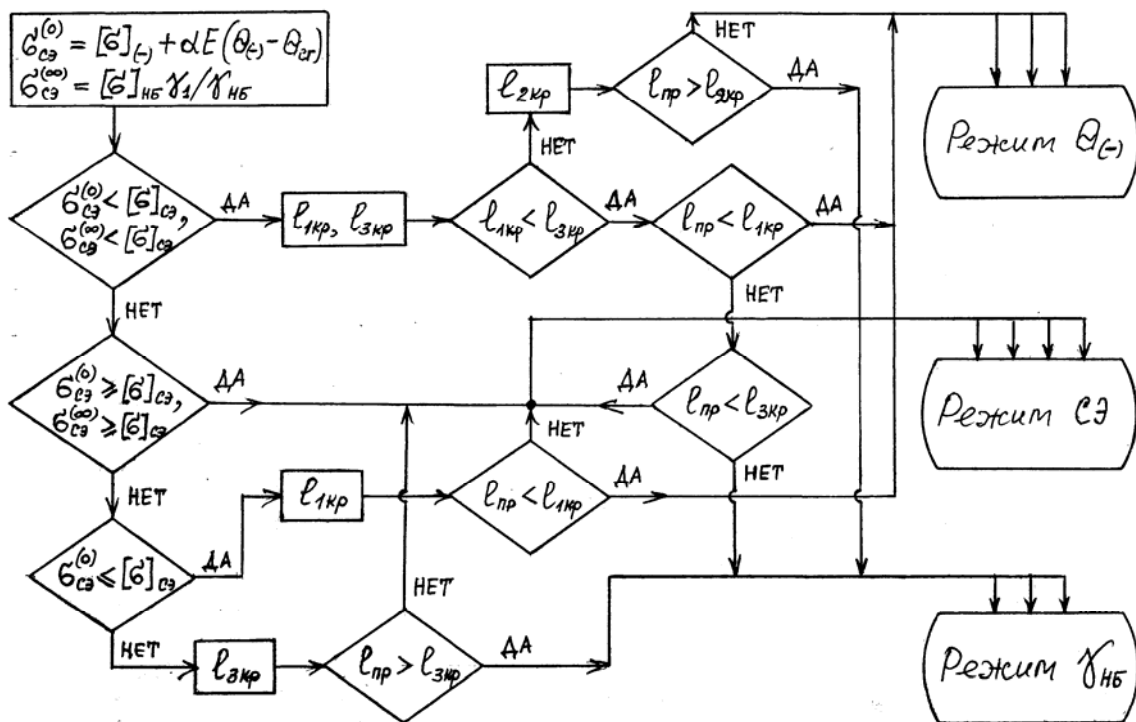


Рис. 2. Логическая блок-схема выбора определяющего расчетного режима

2. РАСЧЕТЫ ПРОВОДОВ В АНКЕРОВАННОМ УЧАСТКЕ С ОТЛИЧАЮЩИМИСЯ ДЛИНАМИ ПРОЛЕТОВ В НОРМАЛЬНОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ ВЛ

Если в анкерованном участке все пролёты имеют равную длину и провода подвешены на одинаковой высоте на всех опорах (равнинная местность, однотипные опоры и гирлянды изоляторов, нет пересечений с препятствиями), то результаты расчётов провода в одном из пролётов (очевидно, что этот пролёт будет габаритным) можно строго распространить на все другие пролёты анкерованного участка. Действительно, во всех пролётах стрелы провеса и механические напряжения имеют одинаковые значения, устанавливающиеся после проведения монтажа проводов на опорах. В дальнейшем, при одновременных и одинаковых изменениях внешних нагрузок (ветер, гололёд) и температуры, тяжения проводов во всех пролётах изменяются одинаково, оставаясь равными, и поэтому гирлянды изоляторов будут сохранять первоначальное вертикальное положение, что означает постоянство расстояний между точками подвески провода, т. е. соответствует неизменности длин пролётов (рис. 3).

Но обычно земная поверхность на продольном профиле трассы ВЛ является неровной (склоны, овраги и т.п.), из-за чего анкерованные участки сооружаются с промежуточными пролётами различных длин. При изменениях внешних условий тяжения проводов по пролётам будут меняться неодинаково, что вызовет появление разностей тяжений, приложенных в точках крепления проводов к гирляндам изоляторов, и отклонениям последних от вертикального положения (рис. 4). Следовательно, при новых климатических условиях, отличных от монтажных, длины пролётов станут другими за счёт смещений точек подвески проводов. Тяжения проводов при этом несколько выравниваются. Ввиду сказанного, в общем случае необходимо проводить расчёты для всего анкерованного участка, ограниченного анкерными опорами, на которых точки крепления проводов не могут смещаться.

Равновесие гирлянды изоляторов

На поддерживающую гирлянду изоляторов промежуточной опоры (см. рис. 3) действуют горизонтальные силы натяжения проводов и вертикальные весовые нагрузки от массы проводов на длине так называемого

"весового" пролёта (расстояние между низшими точками проводов в соседних пролётах) и от массы гирлянды изоляторов, зажима провода и сцепной линейной арматуры и $G_{Г,А}$. При вертикальном положении гирлянды тяжения проводов в их низших точках равны и противоположно направлены, а вертикальные силы действуют вдоль оси гирлянды.

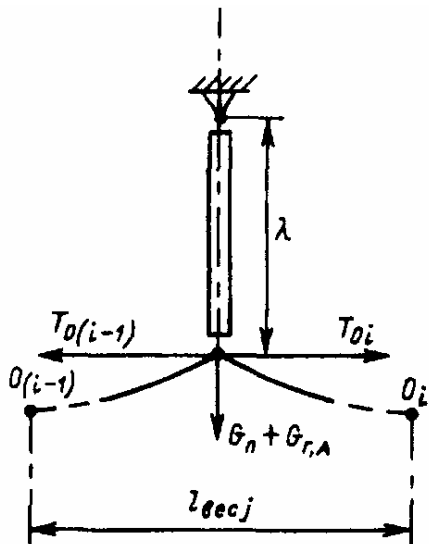


Рис.3. Схема равновесного вертикального положения поддерживающей гирлянды изоляторов после окончания монтажа

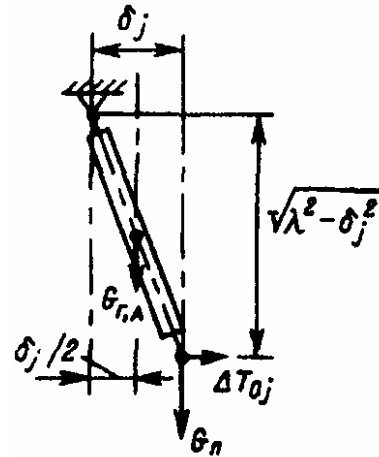


Рис.4. Схема равновесного отклоненного положения поддерживающей гирлянды изоляторов после возникновения разности тяжений в проводах смежных пролётов

Весовой пролёт вычисляется по следующей формуле:

$$l_{весj} = (1/2) (l_{o(i-1)} + l_{o(i)}) + (\sigma_0/\gamma)(tg\psi_{(i-1)} - tg\psi_{(i)}),$$

где $l_{o(i-1)}$ и $l_{o(i)}$ – исходные длины соседних пролётов, определяемые как горизонтальные расстояния между вертикальными осями опор; $\psi_{(i-1)}$ и $\psi_{(i)}$ – углы наклона прямых, соединяющих точки подвески провода в пролётах, по отношению к горизонтали.

Индексы величин соответствуют номерам пролётов (i) и номерам опор (j), причём $i = j + 1$, так как число пролётов всегда превышает число промежуточных опор на единицу.

Пусть по какой-либо причине нарушилось равенство тяжений проводов в соседних пролётах. Под действием возникшей разности тяжений $T_{o(i)} - T_{o(i-1)} = \Delta T_{oj}$ гирлянда повернётся относительно точки её закрепления на траверсе опоры и займёт новое наклонное равновесное положение. Рав-

новесие наступит при равенстве моментов всех действующих сил относительно точки закрепления, рассматриваемой как идеальный шарнир:

$$G_{\Pi} \delta_j + G_{\Gamma, A} (\delta_j / 2) = \Delta T_{0j} \sqrt{\lambda^2 - \delta_j^2}$$

Из уравнения моментов, решаемого относительно разности тяжений:

$$\Delta T_{0j} = \frac{\gamma s \ell_{\text{вес } j} + G_{\Gamma, A} / 2}{\sqrt{(\lambda / \delta_j)^2 - 1}} = (\sigma_{0(j)} - \sigma_{0(j-1)}) S. \quad (3)$$

Отклонение гирлянды выражается из того же уравнения в следующем виде:

$$\delta_j = \frac{s (\sigma_{0i} - \sigma_{0(i-1)}) \lambda \sqrt{1 - (\delta_j / \lambda)^2}}{\gamma s \ell_{\text{вес } j} + G_{\Gamma, A} / 2}.$$

Учитывая, что в нормальных режимах работы ВЛ (провода не оборваны) $\delta_j \ll \lambda$, можно пренебречь малым слагаемым $(\delta_j / \lambda)^2$ и пользоваться упрощенным выражением для определения отклонения гирлянды от вертикального положения

$$\delta_j = \frac{(\sigma_{0i} - \sigma_{0(i-1)}) \lambda}{\gamma \ell_{\text{вес } j} + G_{\Gamma, A} / (2s)}. \quad (4)$$

Система уравнений состояния провода анкерowanego участка

Предположим, что имеется анкерванный участок ВЛ, состоящий из четырёх пролётов различной длины (рис. 5).

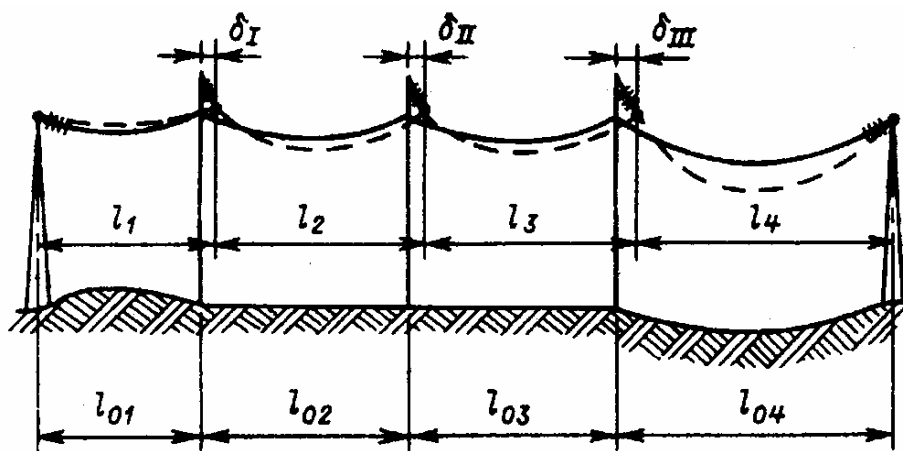


Рис. 5. Схема отклонения гирлянд изоляторов на опорах и изменения провисания проводов в анкерванном участке при гололедной нагрузке

Для каждого пролёта записывается собственное уравнение состояния провода, в котором исходным будет состояние после окончания монтажа проводов; $\Delta \ell_i$ – изменения длин пролетов за счет смещений точек подвески проводов:

$$\begin{aligned} \sigma_{n1} - \ell_{01}^2 \gamma_n^2 E \cos \varphi_1 / (24 \sigma_{n1}^2) &= \\ = \sigma_m - \ell_{01}^2 \gamma_1^2 E \cos \varphi_1 / (24 \sigma_m^2) + \alpha E (\theta_m - \theta_n) + \Delta \ell_1 E / \ell_{01}; \\ \sigma_{n4} - \ell_{04}^2 \gamma_n^2 E \cos \varphi_4 / (24 \sigma_{n4}^2) &= \\ = \sigma_m - \ell_{04}^2 \gamma_1^2 E \cos \varphi_4 / (24 \sigma_m^2) + \alpha E (\theta_m - \theta_n) + \Delta \ell_4 E / \ell_{04}. \end{aligned}$$

В этой системе из четырёх уравнений содержатся восемь неизвестных (σ_{ni} , $\Delta \ell_i$). Для её решения необходимо составить ещё 4 дополнительные соотношения, связывающие неизвестные величины. Одно из таких соотношений (пятое) является очевидным: $\sum_1^4 \Delta \ell_i = 0$.

Требуемые четыре соотношения, являющиеся одинаковыми по своей структуре, записываются для каждого из пролётов, исходя из общей формулы $\Delta \ell_i = \delta_j - \delta_{j+1}$, где δ_j и δ_{j+1} определяются выражениями, аналогичными (4), и зависят от разности соответствующих напряжений в низших точках проводов. Таким образом, система уравнений оказывается решаемой, но получение решения будет очень трудоёмким, поскольку уравнения состояния являются нелинейными (неполными кубическими), и число таких уравнений может в практических задачах достигать 10 – 20. Известен графический метод решения этой задачи, предложенный профессором А.А. Глазуновым в 1928 г.

В инженерной деятельности не всегда требуются точные решения поставленных задач, так как часто считаются приемлемыми приближённые решения с допустимыми погрешностями. Рассматриваемая задача легко решается приближённо методом, предложенным профессором Н.П. Виноградовым в 1931 г. Этот инженерный метод расчёта основывается на допущении о выравнивании тяжёлых, а следовательно, и напряжений во всех пролётах разной длины вследствие отклонения гирлянд изоляторов от вертикального положения при изменении климатических условий. Принятие упомянутого допущения позволяет преобразовать исходную систему уравнений состояния в одно уравнение путём умножения всех членов каждого уравнения на соответствующую исходную длину пролёта и последующего

почленного суммирования всех уравнений состояния. "Суммированное" уравнение при $i = 1, \dots, 4$ примет вид

$$\sigma_n \Sigma l_{0i} - (\gamma_n^2 E / (24 \sigma_n^2)) \Sigma l_{0i}^3 \cos \varphi_i = \\ \sigma_m \Sigma l_{0i} - (\gamma_1^2 E / (24 \sigma_m^2)) \Sigma l_{0i}^3 \cos \varphi_i + \alpha E (\theta_m - \theta_n) \Sigma l_{0i} + E \Sigma \Delta l_i.$$

Затем делением последнего уравнения на сумму первоначальных длин пролётов приводим его к обычному виду с той лишь разницей, что в него входит некоторый усреднённый промежуточный пролёт, получивший название "приведённого":

$$l_{\text{пр}} = \sqrt{\Sigma l_{0i}^3 \cdot \cos \varphi_i / \Sigma l_{0i}}.$$

Таким образом, вводя понятие "приведённого" пролёта, решение задачи можно существенно упростить. Для этого достаточно записать единственное уравнение состояния провода для каждого из анкерованных участков воздушной линии и решить его известными способами:

$$\sigma_n - l_{\text{пр}}^2 \gamma_n^2 E / (24 \sigma_n^2) = \sigma_m - l_{\text{пр}}^2 \gamma_1^2 E / (24 \sigma_m^2) + \alpha E (\theta_m - \theta_n). \quad (5)$$

В таком уравнении исходными могут быть любые условия, так как монтажные условия исключаются из рассмотрения после записи двух уравнений состояния для различных искомых условий и вычитания одного уравнения из другого. Согласно опыту проектирования многочисленных воздушных линий, проходящих в равнинной пересечённой местности, средняя величина "приведённого" пролёта составляет около $0,9 l_{\text{таб}}$. Сравнением величины $l_{\text{пр}}$ с длинами "критических" пролётов устанавливаются единые определяющие климатические условия для всех промежуточных пролётов анкерованного участка в расчёте провода на механическую прочность. Составив уравнение состояния с целью определения напряжения в проводе при его нагрузке гололёдом в отсутствии ветрового давления, можно найти точное значение "критической" температуры и скорректировать выбор климатических условий, при которых провисание проводов будет наибольшим.

Матричный метод решения системы уравнений состояния провода

В практике инженера могут возникать задачи по расчёту проводов ВЛ, результаты решения которых должны быть получены с минимальны-

ми погрешностями. К таким задачам относятся проверки допустимости расстояний от проводов до пересекаемых объектов (автомобильные дороги, воздушные линии электропередачи и связи, железные дороги и т.п.) в нормальных режимах работы и при обрывах проводов, в том числе и для ВЛ, проходящих по населённой местности. При этом требуется знать действительные, а не усреднённые значения напряжения и действительные длины пролётов, т. е. расстояния между смещающимися точками крепления провода к поддерживающим гирляндам изоляторов и действительные расстояния до земли.

Система уравнений состояния провода для анкерowanego участка может быть представлена в матричной записи, что позволяет по-новому увидеть её структуру и возможности разрешения. Изменение расстояния

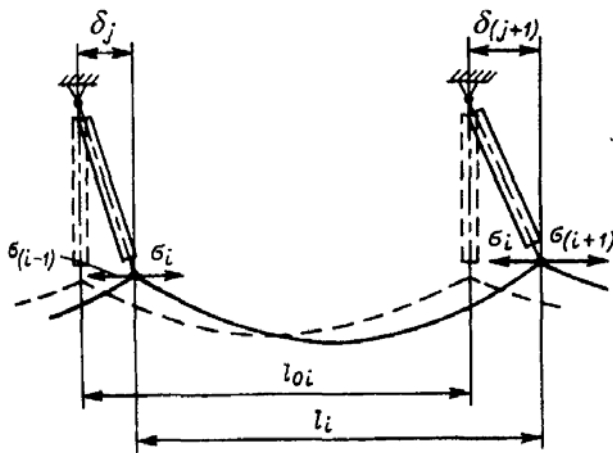


Рис. 6. Изменение длины пролета как результат неодинаковых отклонений поддерживающих гирлянд изоляторов на соседних опорах

между точками подвески проводов в каждом пролёте, за исключением первого и последнего (см. рис. 5), определяется отклонениями гирлянд изоляторов на опорах, ограничивающих пролёт, а эти отклонения зависят от разности напряжений в проводах трёх последовательно расположенных пролётов, для среднего из которых записывается уравнение состояния (рис. 6).

Действительно, с учётом (4)

$$l_i - l_{0i} = \Delta l_i = \lambda (\sigma_{n(i+1)} - \sigma_{ni}) / (\gamma_n l_{всц(j+1)} + 0,5 G_{Г,А} / S) - \lambda (\sigma_{ni} - \sigma_{n(i-1)}) / (\gamma_n l_{всцj} + 0,5 G_{Г,А} / S)$$

Поэтому в каждое из уравнений состояния, кроме упомянутых двух, войдут значения трёх неизвестных напряжений $\sigma_{n(i-1)}$, σ_{ni} , $\sigma_{n(i+1)}$, а все вместе уравнения системы формируются в трёхдиагональную квадратную матрицу (см. ниже), на главной диагонали которой будут расположены слагаемые с искомыми напряжениями σ_{ni} .

Эта система нелинейных уравнений, записанная в матричной форме, может быть разрешена с использованием итерационного метода Ньютона. В алгоритме расчета будут выполняться операции с одностолбцовой матрицей значений функций-уравнений состояния и с трехдиагональной матрицей значений частных производных (матрицей Якоби) от тех же функций, взятых по неизвестным $\sigma_{n(i-1)}$, σ_{ni} , $\sigma_{n(i+1)}$. Однако настоятельная необходимость в применении метода Ньютона возникает только при рассмотрении аварийных обрывов проводов, когда тяжения по проводам в пролетах, соседних с пролетом обрыва, существенно различаются. Для нормальных режимов работы ВЛ решение этой задачи можно получить более простым способом.

Известно, что системы линейных уравнений, представляемые трёхдиагональными матрицами, относительно просто решаются прямым двухэтапным методом "прогонки", являющимся модификацией классического метода Гаусса, ориентированной на действия именно с диагональными (ленточными) матрицами. Линеаризация уравнений состояния, заключающаяся в замене значений напряжения суммами усредненного значения, соответствующего "приведённому" пролёту, и малых вариаций от него, позволяет воспользоваться методом "прогонки". Выполняя линеаризацию, сделаем следующие замены для подстановки в уравнения состояния (величинами второго порядка малости пренебрегаем):

$$\sigma_{ni} = \sigma_{n0} + \Delta\sigma_{ni}; \quad \sigma_{ni}^2 \cong \sigma_{n0}^2 + 2\sigma_{n0}(\Delta\sigma_{ni}); \quad \sigma_{ni}^3 \cong \sigma_{n0}^3 + 3\sigma_{n0}^2(\Delta\sigma_{ni}).$$

Линеаризованная система уравнений состояния в матричной записи будет иметь следующий вид для четырёхпролётного анкерованного участка:

$$\begin{aligned} (\Delta\sigma_{n1})b_1 + (\Delta\sigma_{n2})c_1 &= d_1 \\ (\Delta\sigma_{n1})a_2 + (\Delta\sigma_{n2})b_2 + (\Delta\sigma_{n3})c_2 &= d_2 \\ (\Delta\sigma_{n2})a_3 + (\Delta\sigma_{n3})b_3 + (\Delta\sigma_{n4})c_3 &= d_3 \\ (\Delta\sigma_{n3})a_4 + (\Delta\sigma_{n4})b_4 &= d_4 \end{aligned}$$

При $i = 1, \dots, 4$ коэффициенты в уравнениях таковы:

$$a_i = -\sigma_{n0}\lambda E / (\gamma_n \ell_{0i}(\ell_{всж} + 0,5G / (\gamma_n S)));$$

$$b_i = 3\sigma_{n0} - 2(\sigma_m - \ell_{0i}^2 \gamma_1^2 E \cos\varphi_i / (24\sigma_m^2) + \alpha E(\theta_m - \theta_n)) - (a_i + c_i);$$

$$c_i = -\sigma_{n0}\lambda E / (\gamma_n \ell_{0i} (\ell_{\text{всв}(j+1)} + 0,5G / (\gamma_n S)));$$

$$d_i = \ell_{0i}^2 \gamma_n^2 E \cos \varphi_i / (24\sigma_{n0}) - \sigma_{n0}^2 + \sigma_{n0} (\sigma_m - \ell_{0i}^2 \gamma_n^2 E \cos \varphi_i / (24\sigma_m^2) + \alpha E (\theta_m - \theta_n)).$$

В общем случае, обозначив для $i = 2, 3, \dots, k$,

$$g_i = c_i / (b_i - a_i g_{(i-1)}) \quad \text{и} \quad f_i = (d_i - a_i f_{(i-1)}) / (b_i - a_i g_{(i-1)}),$$

начинаем "прямой" ход (первый этап) решения заменой (см. первую строку матрицы): $\Delta\sigma_{n1} = -\Delta\sigma_{n2}c_1/b_1 + d_1/b_1$.

Далее для $i = 2, 3, \dots, k$ получаются следующие соотношения:

$$\Delta\sigma_{ni} = -\Delta\sigma_{n(i+1)}g_i + f_i; \tag{6}$$

$$\Delta\sigma_{nk} = f_k, \quad \text{так как} \quad c_k = 0.$$

"Обратный" ход (второй этап) решения позволяет определить все значения $\Delta\sigma_{ni}$ последовательной подстановкой ($i = k - 1, k - 2, \dots, 3, 2, 1$) числовых значений в соотношение (6).

Таким образом, решение линеаризованной системы уравнений состояния провода методом "прогонки" по алгоритму является простым, легко и быстро выполнимым даже при ручном способе счёта и числе пролётов до 10.

3. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ МЕТОДИКИ РАСЧЕТОВ ОПОР И ФУНДАМЕНТОВ ПО ПРЕДЕЛЬНЫМ СОСТОЯНИЯМ

В отличие от большинства инженерных сооружений, расположенных локально, воздушная линия электропередачи представляет собой протяжённую строительную систему, состоящую из большого числа опор, поддерживающих провода. Поэтому для ВЛ главными являются внешние механические нагрузки климатического характера (ветер, гололед) и температурные воздействия, проявляющиеся в различных количественных сочетаниях. Эти нагрузки имеют вероятностный характер и изменяются во

времени. Определение их величин является задачей, относящейся к анализу случайных процессов. Исходной информацией при этом служат данные, получаемые путем статистической обработки результатов наблюдений на метеорологических станциях страны. Достоверность этих результатов зависит от длительности и качества выполняемых наблюдений, а также от охвата предполагаемых районов сооружения ВЛ сетью действующих метеостанций.

Ввиду протяженности ВЛ электропередачи как сооружения, проявления тех или иных климатических факторов на отдельных участках трассы линии следует рассматривать как независимые события, которые могут происходить в разное время за период эксплуатации. Значит, вероятность возникновения опасных нагрузок и, следовательно, возможных аварий может приближённо приниматься пропорциональной длине линии. Падение или же поломка любой из опор означает выход из работы всей линии электропередачи.

Кроме того, конструкции ВЛ сооружаются и монтируются в полевых условиях при различной погоде. Строительные площадки перемещаются на большие расстояния по трассе ВЛ. Поэтому надлежащий контроль за качеством строительно-монтажных работ оказывается затруднительным, а доля монтажных дефектов в строительных конструкциях ВЛ неизбежно увеличивается по сравнению с сооружениями, возводимыми стационарно на ограниченных площадках. В результате получается, что аварийность ВЛ намного превышает аварийность локальных сооружений при одинаковых характеристиках внешних нагрузок.

Тем не менее, проектирование ВЛ основывается на принципе, согласно которому, как правило, исключаются аварии при значениях внешних нагрузок меньших или равных некоторым расчётным максимальным, и аварии возможны, если происходит маловероятное их превышение, но при этом обеспечивается заданный уровень общей надёжности ВЛ. Такой подход позволяет проектировать рациональные конструкции опор, фундаментов и других элементов линий, экономя при этом строительные материалы.

Действующими Правилами Устройства Электроустановок (ПУЭ, 6-е издание) предписывается применять разные методы для расчётов на механическую прочность отдельных конструктивных элементов ВЛ. Провода и

грозозащитные тросы рассчитываются по методу допускаемых напряжений, линейные изоляция и арматура – по методу разрушающих нагрузок, а опоры и их фундаменты, изготовляемые из любых материалов, а также основания фундаментов (грунты, воспринимающие давление) – по методу предельных состояний, являющемуся с 1964 г. узаконенным и универсальным методом расчётов всех строительных конструкций ВЛ.

Задачей проектирования ВЛ является обоснованный выбор конструкций опор и фундаментов среди типовых и унифицированных (при уже известных числе цепей, конструкции фазы и марки проводов) или же определение размеров и поперечных сечений их элементов (уголкового проката, бревен и т. п.) при проектировании новых опор такими, чтобы обеспечивалась безаварийная эксплуатация ("безотказность") с достаточной степенью надёжности. При этом специалистов интересуют такие граничные условия эксплуатации, или, иначе говоря, предельные состояния, при достижении которых конструкция перестаёт удовлетворять предъявляемым к ней требованиям, а эти требования состоят в следующем:

- 1) обеспечение прочности и устойчивости конструкции, т. е. её несущей способности;
- 2) обеспечение жёсткости конструкции, т. е. соблюдение допустимых деформаций и перемещений;
- 3) отсутствие трещин или же ограничение ширины их раскрытия для железобетонных элементов конструкций.

Наступление предельных состояний зависит от многих причин. Все эти причины можно распределить на три совокупности:

- 1) механические свойства материалов изготовления опор и фундаментов и физические свойства грунта оснований, обладающие естественной изменчивостью (разбросом параметров), определяемой физической природой самого грунта и технологией изготовления материала;
- 2) действительные условия работы элементов в конструкции, особенности её изготовления (способы крепления элементов могут быть разными);
- 3) возможная изменчивость значений внешних нагрузок, воздействующих на конструкцию в сочетании с неодинаковой продолжительностью их действия.

Очевидно, что для учёта всех упомянутых факторов необходимо иметь их количественные оценки.

Метод расчёта по допускаемым напряжениям, применявшийся до 1964 г. для расчётов металлических опор, и метод разрушающих нагрузок (железобетонные опоры и фундаменты) не учитывали изменчивость внешних нагрузок и её зависимость от природы нагрузки (гололёдная или ветровая) и неодинаковые условия работы разных элементов в конструкциях. В этих методах одинаковый коэффициент запаса назначался для всех элементов конструкции, в результате чего на изготовление конструкций расходовалось излишнее количество материалов.

Основной смысл перехода к новому методу расчётов по предельным состояниям заключался в экономии материалов изготовления за счёт отказа от единого коэффициента запаса прочности для всех элементов и назначения для них индивидуальных целесообразных запасов на основании учёта реальных условий работы каждого элемента, реальных внешних нагрузок на конструкцию и реальных свойств материалов изготовления и грунтов.

В рассматриваемом методе возможные предельные состояния конструкции разделяются на две неравнозначные группы:

– первая (I) включает предельные состояния, характеризующиеся потерей конструкцией своей несущей способности и её полной непригодностью к дальнейшей эксплуатации;

– вторая (II) объединяет предельные состояния, обусловленные непригодностью конструкции к длительной эксплуатации (разрешается временная эксплуатация с учётом некоторых ограничений).

Расчёты конструкций с целью выявления возможности наступления предельных состояний группы I включают проверку на прочность конструктивных элементов, проверку устойчивости положения опоры в пространстве и проверку сохранения формы конструкции. Этим проверкам подлежат опоры всех типов, назначений и материалов изготовления, все фундаменты и их основания без исключения. Соответствующие расчёты по группе II предельных состояний предполагают проверки деформаций и перемещений в конструкциях на их временную допустимость по условиям эксплуатации. При этом проверяются: деформации оснований фундаментов всех опор; прогибы (горизонтальные смещения) верхушек металлических и железобетонных анкерных опор всех модификаций (прямые, угловые, концевые) и переходных опор всех типов (анкерные и промежуточные) при их высотах более 60 м, а также вертикальные смещения концов траверс вышеуказанных металлических и железобетонных опор. Для деревянных анкерных и обычных промежуточных опор всех материалов из-

готовления деформации не ограничиваются нормами, т. е. эти опоры не проверяются на возникновение предельных состояний группы II. Дополнительно все несущие элементы железобетонных опор должны рассчитываться на трещиностойкость при нагрузках нормальных режимов работы. К некоторым железобетонным элементам требование трещиностойкости не предъявляется, но ограничивается ширина раскрытия трещин значением 0,2 мм с целью обезопасить стальную внутреннюю арматуру стоек и траверс от коррозии, обеспечивая требуемую долговечность элементов.

Терминология метода расчетов строительных конструкций по предельным состояниям

Способность материалов противостоять действию внешних сил характеризуется нормативным сопротивлением R^H . Под этим понимается предел прочности (на сжатие, изгиб и др. виды напряжённого состояния) или же предел текучести (например при растяжении стали) для известных материалов в соответствии с действующими государственными стандартами, а для новых материалов – на основании результатов испытаний. Стандартами допускаются некоторые отклонения действительных сопротивлений от нормированных значений, обусловленные технологией изготовления материала (к примеру, слитки стали двух разных плавов или же бетонные детали, изготовленные из двух замесов одинакового состава, будут отличаться механическими свойствами). Поэтому необходимо учитывать возможность снижения действительного сопротивления материала по сравнению с нормативным, т. е. ослабление прочности. Такой учёт осуществляется делением нормативного сопротивления на коэффициент безопасности, превышающий 1. Результат деления называется расчётным сопротивлением материала R . Естественно, что коэффициенты безопасности имеют разные значения для различных материалов (сталь $\rightarrow 1,1$; железобетон \rightarrow от 1,25 до 1,4 в зависимости от типа применяемой арматуры). Расчётные сопротивления известных материалов изготовления приводятся в Строительных Нормах и Правилах (СНиП) для всех видов напряжённого состояния (растяжение, сжатие, изгиб, кручение, сдвиг).

В отдельных случаях при проектировании наиболее ответственных сооружений, а также при недостаточной изученности работы новой конструкции вводится дополнительный коэффициент надёжности, больший 1, на который делится расчётное сопротивление с целью увеличения факти-

ческого запаса прочности. Коэффициенты надёжности определяются соответствующими нормативными документами. Условия работы отдельных элементов в конструкции могут сильно отличаться. В частности, прокатные профили – уголки, из которых изготавливаются пояса, раскосы или стержни диафрагм металлических опор, крепятся одной стороной (полкой) при помощи сварки (жёсткое крепление) или на болтах и заклёпках (шарнирное крепление). Поэтому продольная гибкость и устойчивость стержней будет разной. Нагружение уголков является эксцентричным, так как точки приложения внутренних сил сжатия смещены относительно центров тяжести сечений уголков. Кроме того, существует несколько схем обрешёток опор: треугольная, ёлочная, перекрёстная со смещёнными и совмещёнными узлами. Из-за неодинакового числа стержней, соединяемых в узлах упомянутых схем, жёсткость узлов и эксцентриситеты приложения сил оказываются различными. Для учёта реальных условий работы отдельных элементов в конструкциях вводятся коэффициенты условий работы m , меньшие или равные 1. На эти коэффициенты умножаются расчётные сопротивления конструкционных материалов.

Воздействие внешних атмосферных нагрузок характеризуется как их возможными значениями, так и вероятными продолжительностями проявления. Нормативные значения нагрузок являются их основными характеристиками. Они устанавливаются в соответствии с требованиями ПУЭ и СНиП для различных географических районов сооружения ВЛ по территории страны, отвечая условиям эксплуатации сооружения. Мерой возможного отклонения реальных нагрузок в неблагоприятную (обычно большую или же иногда меньшую) сторону от своих нормативных значений вследствие изменчивости или же отступлений от условий нормальной эксплуатации служат коэффициенты перегрузки n . Нагрузкам различной физической природы назначаются соответствующие коэффициенты перегрузки с диапазоном значений от 1,1 (собственный вес) до 2,0 (вес гололёда). Расчётными нагрузками называются нормативные нагрузки, умноженные на свойственные им коэффициенты перегрузки.

В зависимости от продолжительности проявления выделяются постоянно действующие и временные нагрузки. Временными являются нагрузки, которые в отдельные периоды строительства и эксплуатации могут отсутствовать. В свою очередь они различаются на кратковременные, длительные и особые. Конкретные внешние нагрузки, относящиеся к разным временным группам, перечислены в классификационной блок-схеме (рис. 7).

Согласно ПУЭ, опоры, фундаменты и их основания должны рассчитываться на работу в режимах трёх видов: нормальные, аварийные и монтажные. Нормальными именуется режимы работы при необорванных проводах и тросах. Нормальная работа происходит в течение большей части времени эксплуатации, поэтому эти режимы считаются длительными.

Сочетания внешних нагрузок различной физической природы, принимаемых действующими на конструкции в нормальных режимах работы и, кроме того, в монтажных режимах (опор, грозозащитных тросов, проводов), называются основными сочетаниями нагрузок. При этом расчёты проводятся с использованием постоянных, кратковременных и длительных временных расчётных нагрузок без введения к ним каких-либо понижающих коэффициентов.

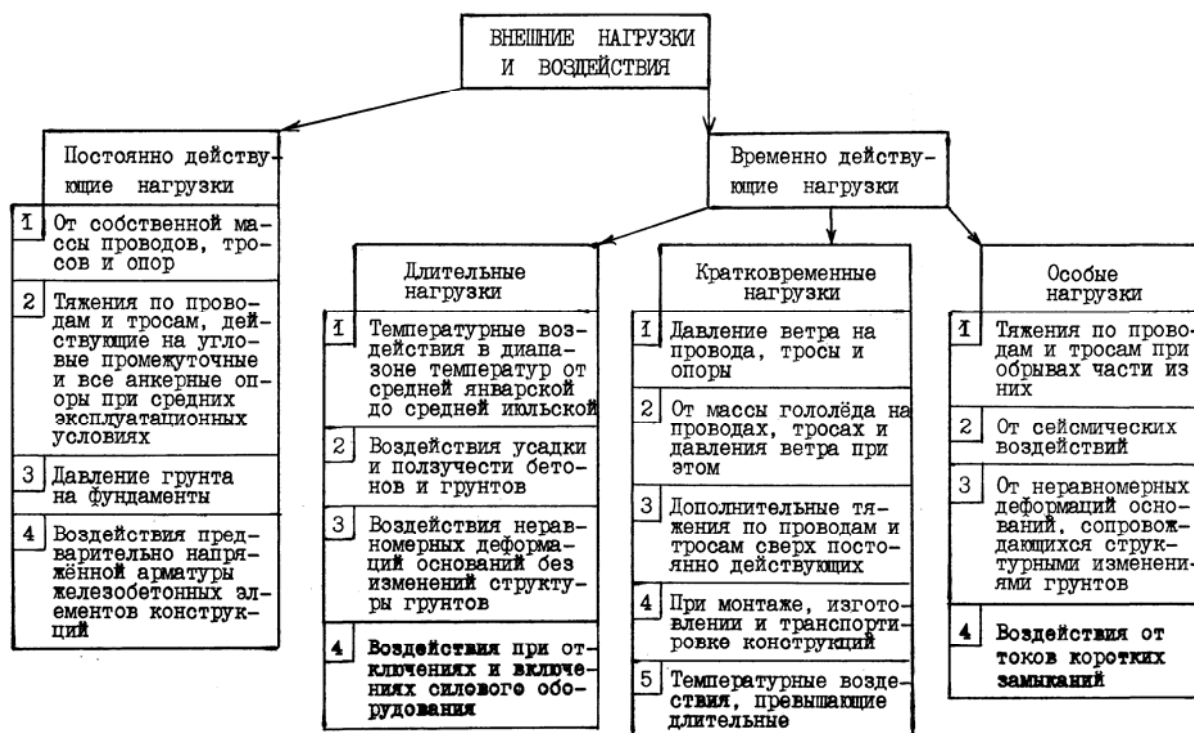


Рис. 7. Классификационная блок-схема

К аварийным относятся режимы работы при обрывах проводов и грозозащитных тросов. Продолжительность таких режимов невелика (от нескольких часов до нескольких суток), так как ВЛ должны восстанавливаться в кратчайшие сроки, чтобы уменьшить недоотпуск электроэнергии. Очевидно, что при этом не имеет практического смысла исходить из положения о воздействии наиболее тяжёлых расчётных нагрузок, иначе редко возникающие аварийные режимы станут определяющими в выборе разме-

ров и поперечных сечений элементов конструкций, вызывая перерасход материалов изготовления. Поэтому в расчётах аварийных режимов, а также при сейсмических воздействиях и динамических воздействиях токов короткого замыкания применяются особые сочетания нагрузок, состоящие из постоянных, длительных, возможных кратковременных и одной из особых нагрузок. В таких сочетаниях кратковременные нагрузки умножаются на понижающие коэффициенты сочетаний k_c , а остальные учитываемые расчётные нагрузки, включая особую, принимаются без снижения. Например, при расчётах промежуточных опор, их фундаментов и оснований на обрывы проводов или тросов вводится $k_c = 0,8$, а для анкерных опор – $k_c = 0,9$.

4. ВОЗДЕЙСТВИЕ ВЛ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

Влияние ВЛ на окружающую среду является весьма разнообразным. Основные проявления этого влияния следующие:

- 1) изъятие участков земли под опорами ВЛ из землепользования;
- 2) эстетическое воздействие опор и других элементов ВЛ на ландшафт;
- 3) воздействие электрического поля относительно высокой напряженности на живые организмы под проводами ВЛ и в пределах ее охранной зоны;
- 4) акустические шумы и радиопомехи из-за коронирования проводов и линейной арматуры;
- 5) выделение озона и окислов азота, высокая концентрация которых в воздухе неблагоприятно воздействует на растительность и живые организмы;
- 6) электромагнитное воздействие на другие воздушные и подземные протяжённые коммуникации.

С 1973 г. в составе Исследовательского Комитета № 22 СИГРЭ была создана специальная рабочая группа 02 по вопросам проектирования и строительства ВЛ электропередачи с учетом интересов окружающей среды. Эта рабочая группа обобщила воздействия ВЛ и в 1976 г. подготовила окончательную редакцию доклада Исследовательского Комитета № 22 “Линии электропередачи и окружающая среда.”

В этом докладе отмечается, *что ВЛ не представляют значительной угрозы окружающей среде*, так как они не загрязняют воздух, землю и воду.

ВЛ СВН причиняют некоторые неудобства хозяйственной деятельности человека (радиопомехи, шумы и высокая напряженность электрического поля под проводами) и ограничения при проведении сельскохозяйственных работ. *Наибольшее отрицательное влияние* на общественное мнение, особенно в развитых странах с высокой плотностью населения, оказывает внешний вид ВЛ, т.е. *эстетическое воздействие*.

Из перечня возможных влияний (см. выше) мы рассмотрим только два первых, т.к. остальные рассматриваются в курсах “Изоляция и перенапряжения” и “Охрана труда”.

Изъятие земли из землепользования

По нормам бывшего СССР постоянному, т.е. бессрочному изъятию, подлежат только площадки земной поверхности, отводимые под опоры и их фундаменты (анкерные плиты оттяжек). Размеры этих площадок ограничиваются размером основания опоры с прибавлением полосы шириной 2 м по всему периметру основания. При этом для опор на оттяжках периметр основания опоры проходит через точки крепления оттяжек к фундаментам (анкерным плитам). Например, для опоры 750 кВ (шифр П-750-1, порталная на оттяжках) отчуждаемая площадь имеет вид ромба и составляет 635 м^2 с диагоналями 43,6 м (перпендикулярно трассе) и 23 м (стороны ромба – 26,2 м с углом примерно 70°). Справка: норма садового участка 600 м^2 .

Для определения размеров площадки под опоры, устанавливаемые *на пахотных землях*, приходится определять среднюю величину площади необрабатываемой земли у оснований опор, ориентируясь на три возможные направления движения механизмов: поперек, вдоль и под углом 45° к оси ВЛ (берется средняя арифметическая цифра от трех значений площади).

Стоимость изымаемой земли под опоры ВЛ в СССР оценивалась как затраты на рекультивацию (восстановление) земли с аналогичными характеристиками по плодородию и устанавливалась соответствующими нормами для отдельных районов страны (имеется ввиду освоение новых земель, в противном случае землепользователям выплачивалась компенсация).

Кроме постоянного изъятия земли под опоры ВЛ на период строительства и сооружения линий производится временное отчуждение у землепользователей полосы земли вдоль трассы для проезда применяемых при сооружении механизмов (монтаж опор, проводов и тросов).

Нормами установлены предельные значения ширины таких полос. Так для ВЛ 330 и 500 кВ соответственно: железобетонные опоры – 21 и 28 м, стальные свободностоящие опоры – 18 и 30 м, стальные двухцепные опоры и опоры с оттяжками – 22 и 33 м. Ширина временно отчуждаемых полос земли для ВЛ, сооружаемых в лесных массивах, согласуется с организациями, в ведении которых находятся эти леса.

Кроме того, временному изъятию подлежат площадки земли, необходимые для проведения монтажа и подъема опор в местах их размещения по трассе, а также площадки для размещения складов и жилых поселков строительного-монтажного персонала и для прокладки временных подъездных дорог к трассе строящейся ВЛ.

После завершения строительства все эти земли должны быть рекультивированы за счет средств строительного-монтажной организации (еще до сдачи ВЛ в эксплуатацию).

Эстетическое воздействие

Эстетическое воздействие связано в основном с размерами (главным образом, с высотой опор) и архитектурными формами с точки зрения технической эстетики, а также с цветом конструкций. Обычно стремятся к тому, чтобы опоры не выделялись на местности и не портили ландшафт (на Западе). В нашей стране такими же должны быть требования к ВЛ, проходящим в районах национальных лесопарков, курортов и в густонаселенных районах страны.

С точки зрения снижения визуального воздействия ВЛ могут быть рекомендованы следующие мероприятия:

- 1) выбор трасс ВЛ с наименьшим ущербом для окружающей среды;
- 2) естественное прикрытие (экранирование);
- 3) реконструкция существующих ВЛ путем замены их на ВЛ более высокого класса напряжения ($U_{ном}$), а иногда – на двухцепные (уменьшение ширины трассы);
- 4) маскировка конструкций (окраска);
- 5) выбор лучших конфигураций опор.

Однако подход должен быть комплексным, т.е. следует избегать применения конструкций опор, пригодных только с эстетической точки

зрения, так как такие конструкции оказываются не только слишком дорогими, но и, как правило, не будут удовлетворять техническим и инженерным требованиям. Следует, в первую очередь, стремиться совершенствовать уже известные и испытанные схемы опор (кстати, опора "Бочка" признается эстетически удачной). То же самое можно сказать о выборе трасс ВЛ. Следует по возможности обходить районы, обладающие высокой ценностью с точки зрения красоты, которые хорошо просматриваются с автодороги и железной дороги; использовать естественные прикрытия в виде леса или холмов. В лесных районах следует стремиться к минимально допустимой ширине просеки и не делать ее перпендикулярной к пересекаемым дорогам и прямолинейной. Но не следует впадать в крайность, иначе стоимость сооружения существенно увеличится.

Совместимость внешнего вида ВЛ с окружающей средой – это соответствие общего вида линии основному характеру местности с целью сделать линию как можно менее заметной. Применение различных схем и конструкций опор для облегчения их естественного прикрытия (экранирования) в зависимости от окружающей местности представляется нецелесообразным, так как при этом значительно усложняются и удорожаются как проектирование, так и строительство ВЛ СВН. По-видимому, наиболее правильным является применение опор одной конструкции, но разной высоты для лучшего слияния с окружающей местностью. В этом случае обычно удается обеспечить и наиболее экономичную расстановку опор по профилю трассы (разные длины пролетов).

В США в 70-е г. были опубликованы "Требования окружающей среды к электрическим сетям (Руководство по выбору трасс линий)" со следующими рекомендациями:

1) сооружения ВЛ (опоры и провода) не должны вырисовываться на горизонте на фоне неба, следует избегать пересечения возвышенностей по вершине;

2) в лесных районах следует, избегая прямых трасс и просек, периодически изменять направление трассы под небольшим углом (зигзагообразная трасса);

3) при пересечении ВЛ перекрестка автодорог в лесу оставлять часть деревьев вдоль дороги с тем, чтобы скрыть просеку для ВЛ от проезжающих в автомобилях.

Блестящие поверхности металлических опор и проводов, оцинкованных элементов арматуры привлекают зрительное внимание и являются нежелательными. Следует предусмотреть окраску всей поверхности опоры и арматуры светопоглощающими красками темно-зеленого и черного цветов, которые лучше всего подходят к фону хвойных деревьев и скал.

Неизолированные алюминиевые провода имеют блестящую поверхность только 1 – 2 года после монтажа, затем их поверхность темнеет, покрываясь серой оксидной пленкой (в некоторых зарубежных странах их поверхность делают матовой еще до монтажа с помощью пескоструйных автоматов). Стекланные изоляторы хорошо сливаются с фоном неба.

Новые архитектурные формы: трехгранные стойки опор (Италия) требуют меньше стержней, менее громоздки, имеют примерно одинаковую площадь проекций граней.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Правила устройства электроустановок. – 7-е изд. – М. : Изд-во НЦ ЭНАС, 2003. – 160 с.
2. *Зеличенко, А. С.* Проектирование механической части воздушных линий сверхвысокого напряжения / А. С. Зеличенко, Б. И. Смирнов. – М. : Энергоиздат, 1981. – 336 с.
3. *Кессельман, Л. М.* Основы механики воздушных линий электропередачи / Л. М. Кессельман. – М. : Энергоатомиздат, 1992. – 352 с. – ISBN 5-900835-16-2.
4. Повышение эффективности электросетевого строительства / А. А. Зевин, К. П. Крюков, А. И. Курносов [и др.] ; под ред. Н. Н. Тиходеева. – Л. : Энергоатомиздат, 1991. – 240 с. – ISBN 5-06-003652-9.
5. Справочник по электрическим установкам высокого напряжения / под ред. И. А. Баумштейна, С. А. Бажанова. – 3-е изд. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 768 с.
6. Справочник по сооружению линий электропередачи напряжением 35 – 750 кВ: справочник мастера / сост.: С. В. Крылов [и др.] ; под ред. М. А. Реута. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 496 с.
7. Электрические системы. Электрические сети / под ред. В. А. Веникова, В. А. Строева. – М. : Высш. шк., 1998. – 511 с. – ISBN 5-93037-063.
8. Электрические системы и сети в примерах и иллюстрациях / под ред. В. А. Строева. – М. : Высш. шк., 1999. – 352 с.
9. Электротехнический справочник. В 4-х т. Т. 3. Производство, передача и распределение электрической энергии / под общ. ред. проф. МЭИ В. Г. Герасимова [и др.]; гл. ред. А. И. Попов. – 8-е изд., испр. и доп. – М. : Изд-во МЭИ, 2002. – 964 с. – ISBN 5-7046-0750-0.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
1. Выбор определяющего нормативного сочетания климатических условий в расчетах проводов ВЛ на механическую прочность	4
2. Расчеты проводов в анкерovanном участке с отличающимися длинами пролетов в нормальном режиме работы ВЛ.....	11
3. Основные понятия методики расчетов опор и фундаментов по предельным состояниям	18
4. Воздействие ВЛ на окружающую среду.....	25
Библиографический список.....	30

Методические указания к расчетно-графическим
работам по дисциплине «Воздушные и кабельные линии».
Методы расчетов конструктивной части воздушных линий
электропередачи

Составители

ЗАРУДСКИЙ Георгий Константинович

КОРОВКИН Андрей Венедиктович

СБИТНЕВ Станислав Александрович

Ответственный за выпуск – зав. кафедрой, профессор С.А. Сбитнев

Редактор Л.В. Пукова

Технический редактор Н.В. Тупицына

Корректор Т.В. Климова

Компьютерная верстка Е.Г. Радченко

ЛР № 020275. Подписано в печать 13.03.06.

Формат 60x84/16. Бумага для множит. техники. Гарнитура Таймс.
Печать на ризографе. Усл. печ. л. 1,86. Уч.-изд. л. 1,96. Тираж 100 экз.

Заказ

Издательство

Владимирского государственного университета.

600000, Владимир, ул. Горького, 87.