

УДК 621.

**Механические воздействия внешних факторов на ЛЭП**

Студенты гр. 10609123 Пономаренко Р.Е., Цецоха Н.С.

Научный руководитель – старший преподаватель Куранова О.В.

Белорусский Национальный Технический Университет

Минск, Беларусь

В инженерной практике нам нередко приходится сталкиваться с линиями электропередач. С точки зрения механики это крайне сложно устроенный объект, которому присущи определенные проблемы и особенности строения этого сооружения. Из вопросов, которые интересны со стороны механики: конструкция, также интересуют проблемы, которые связаны непосредственно с проводами.

Опоры ЛЭП – одно из самых распространенных инженерных сооружений. Чаще всего мы представляем себе опору ЛЭП в виде решетчатой конструкции. Лет 30 назад это был единственный вариант, да и в наши дни их продолжают строить. На место строительства привозят набор металлических уголков и шаг за шагом свинчивают из этих типовых элементов опору. Затем приезжает кран и ставит конструкцию вертикально. Такой процесс занимает довольно много времени, что сказывается на сроках прокладки линий, а сами эти опоры с унылыми решетчатыми силуэтами весьма недолговечны. Причина — слабая защита от коррозии. Технологическое несовершенство такой опоры дополняет простой бетонный фундамент.

**Усовершенствованный тип опор**

Новым вариантом для установки опор выступают трубки вместо уголков. Это цилиндрические стойки из гнутого профиля, фактически трубы, в поперечном сечении имеющие вид многогранника. Кроме того, мы стали применять новые методы антикоррозионной защиты, в основном метод горячего цинкования. Это электрохимический способ нанесения защитного покрытия на металл. В агрессивной среде слой цинка истончается, но несущая часть опоры остается невредимой.

Помимо большей долговечности новые опоры отличаются еще и простотой монтажа. Никаких уголков больше свинчивать не надо: трубчатые элементы будущей опоры просто вставляются друг в друга, затем соединение закрепляется. Смонтировать такую конструкцию можно в восемь-десять раз быстрее, чем собрать решетчатую. Соответствующие преобразования претерпели и фундаменты. Вместо обычного бетонного стали применять так

называемые сваи-оболочки. Конструкция опускается в землю, к ней крепится ответный фланец, а на него уже ставится сама опора.

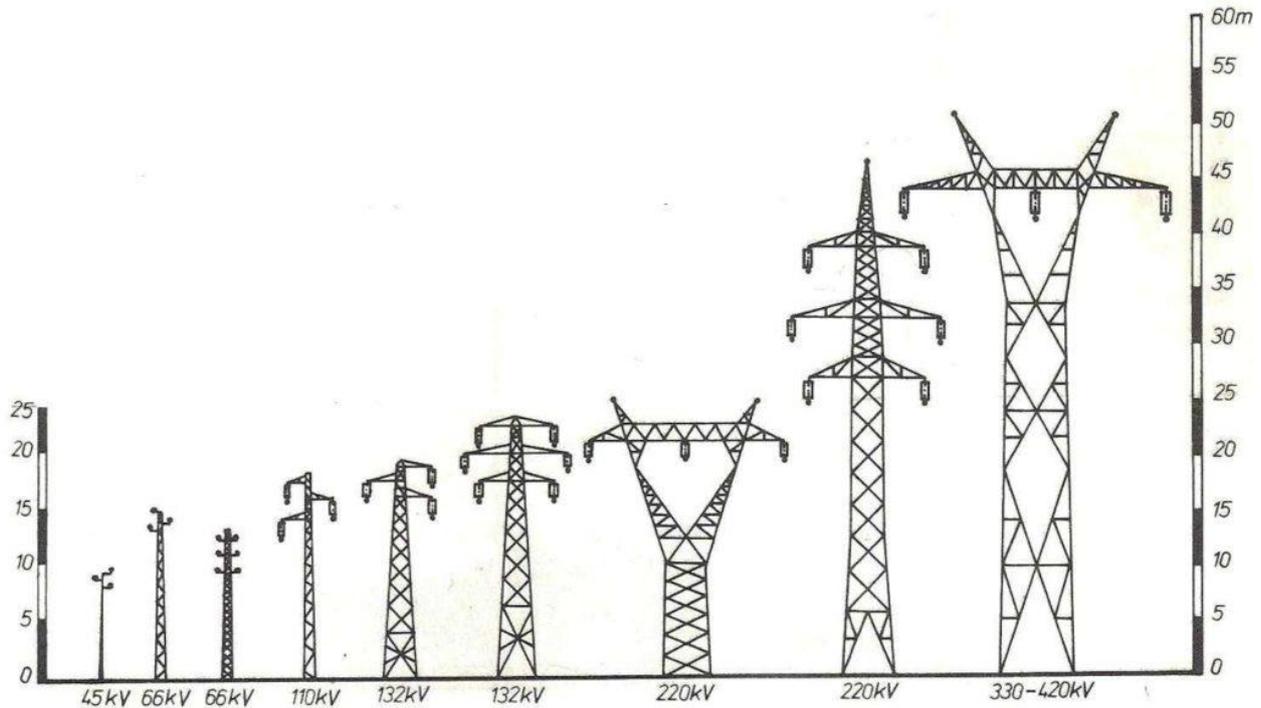


Рис. 1. Типы опор линий электропередач

### Расчет опор ЛЭП

До середины 60-х годов в СССР расчет стальных и деревянных опор производился по методу допустимых напряжений, а расчет железобетонных опор и оснований фундаментов опор из любого материала — по методу разрушающих нагрузок. В настоящее время расчет опор и их оснований производится по новому методу — методу предельных состояний.

Опоры, фундаменты или закрепления в грунте должны быть рассчитаны на сочетания расчетных нагрузок нормальных режимов по первой и второй группам предельных состояний, а также аварийных и монтажных режимов ВЛ по первой группе предельных состояний.

Первая группа включает предельные состояния, которые ведут к потере несущей способности элементов или к полной непригодности их в эксплуатации, т. е. к их разрушению любого характера. К этой группе относятся состояния при наибольших внешних нагрузках и при низшей температуре, т. е. при условиях, которые могут привести к наибольшим

изгибающим или крутящим моментам на опоры, наибольшим сжимающим или растягивающим усилиям на опоры и фундаменты.

Вторая группа включает предельные состояния, при которых возникают недопустимые деформации, перемещения или отклонения элементов, нарушающие нормальную эксплуатацию, к этой группе относятся состояния при наибольших прогибах опор.

Метод расчета по предельным состояниям имеет целью не допускать, с определенной вероятностью, наступления предельных состояний первой и второй групп при эксплуатации, а также первой группы при строительстве.

Нагрузки, соответствующие условиям эксплуатации конструкции или сооружения, называются нормативными нагрузками. В расчетах опор и их оснований принимают расчетные нагрузки, получаемые путем умножения нормативных нагрузок на коэффициенты перегрузки. Эти коэффициенты определены в зависимости от вероятности превышения нагрузок различных видов и от режима.

При расчете дополнительных нагрузок на опору от подвеса кабеля следует рассматривать следующие режимы работы:

- Нормальный режим.
- Режим максимального ветра под углом  $45^\circ$  к линии.
- Режим максимального ветра перпендикулярного линии.
- Режим гололеда с ветром. Ветровой напор перпендикулярно линии, максимальный гололед.
- Аварийный режим. Обрыв кабеля.
- Монтажный режим. Для промежуточной опоры: ветер и гололед отсутствуют, учитываются вес монтажной оснастки и монтажника.

На опору от подвеса на нее будут действовать 3 типа сил:

- $G$  — вертикальная сила, обусловленная силой тяжести кабеля, гололеда и монтажника;
- $P$  — горизонтальная поперечная сила, обусловленная воздействием ветра на кабель;
- $T$  — горизонтальная продольная сила, натяжение кабеля в нижней точке кривой провеса.

– Нормативная горизонтальная сила  $T$  рассчитывается по формуле:

$$T = H * \cos \alpha$$

где  $\alpha$  — угол между вектором тяжения  $H$  и горизонтальной продольной осью

$$\tan \alpha = \frac{4S}{L}$$

$S$  – стрела провеса при рассматриваемом режиме

$L$  – длина пролета между соседними опорами

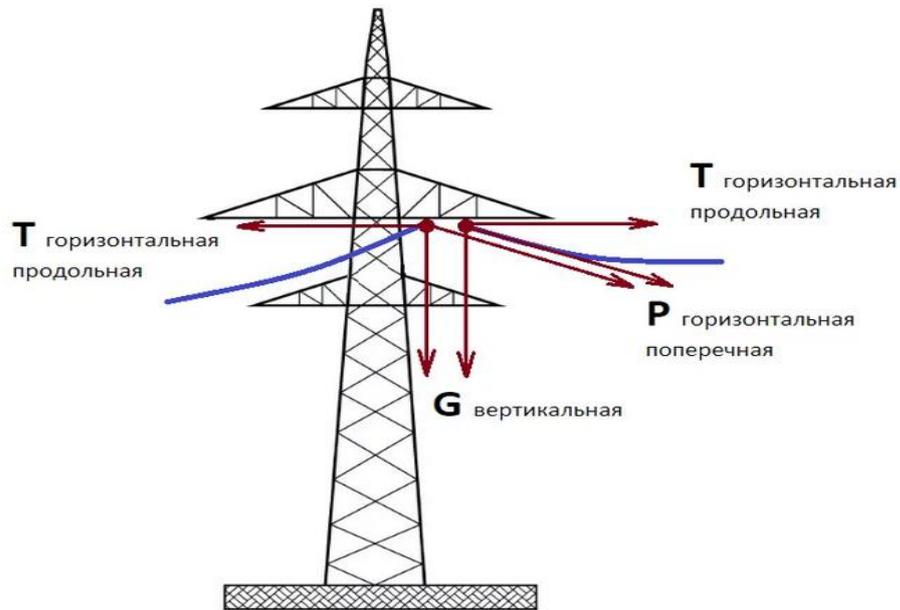


Рис. 2. Силы, действующие на опору со стороны кабеля

Расчет вертикальной нагрузки на опору в рассматриваемом режиме, обусловленную силой тяжести кабеля и гололеда  $G$ , выполняется не через проекцию тяжения на вертикальную ось, а напрямую. Следует помнить, что весовая нагрузка в пролете распределяется на обе опоры поровну если точки подвеса расположены на одной высоте. В общем случае весовая нагрузка от кабеля действует на опору от точки закрепления на опоре и до самой нижней точки кривой провеса кабеля.

Нормативную горизонтальную поперечную нагрузку, обусловленную воздействием ветра, можно найти не через проекцию тяжения на горизонтальную поперечную ось, а также напрямую. Следует помнить, что ветровая нагрузка в пролете распределяется на обе опоры поровну

В расчете момента, действующего на основание опоры, принимаются только горизонтальная поперечная и продольная силы. Находится их суперпозиция и умножается на высоту подвеса кабеля.

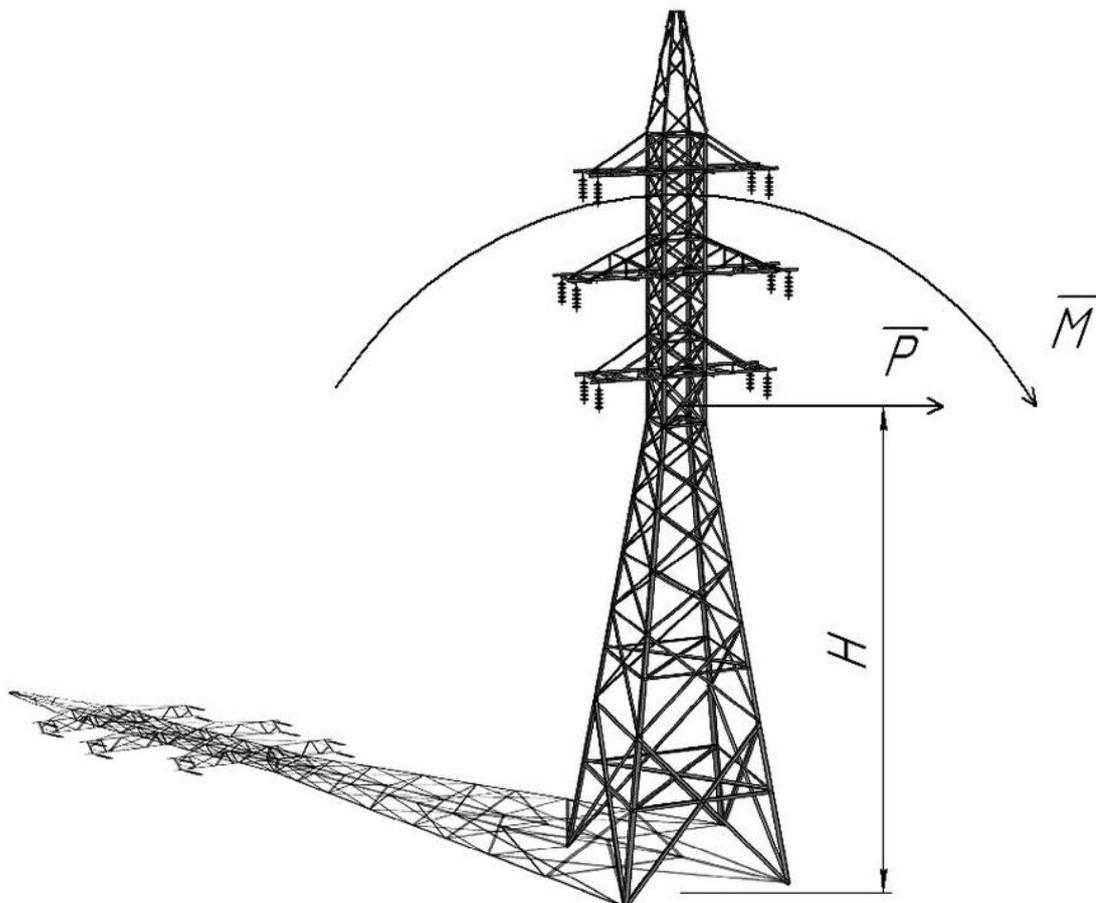


Рис. 3. Момент силы  $M$  на основание опоры

В каждом случае на столб ЛЭП, как и на опору освещения, действует комплекс разных нагрузок.

- $G_{оп}$  – собственный вес опоры.
- $G_{г}$  – вес изоляторов.
- $G_{п}$  – вес проводов.
- $G_{т}$  – вес тросов без гололеда.
- $\Delta T$  – нагрузка от натяжений проводов.
- $\Delta T_{т}$  – нагрузка от тросов.

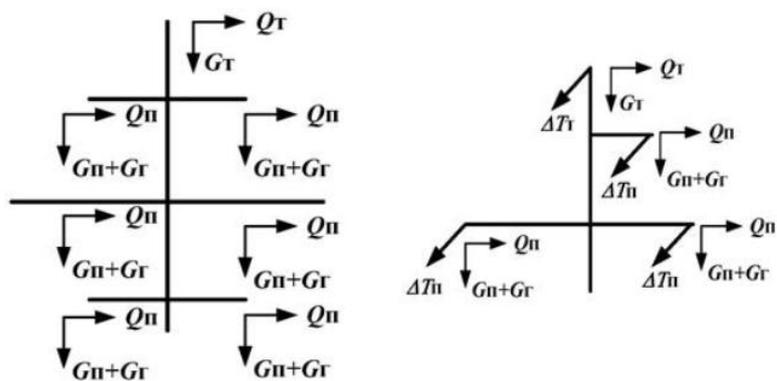


Рис. 4. Схема нагрузок для двухцепной и анкерной опор

При расчете опоры ЛЭП прослеживается последовательность вычислений:

1. Определение нормативных постоянных и кратковременных нагрузок.
2. Вычисление расчетных нагрузок путем умножения нормативных значений на коэффициент перегрузки в нормальных и аварийных режимах.
3. Суммирование отдельно вертикальных и горизонтальных нагрузок.
4. Расчет изгибающих моментов от внешних нагрузок, действующих вдоль и перпендикулярно траверсе, а также расчетного крутящего момента от натяжения проводов (силы и моменты изображают на эпюрах, как на рисунке ниже).

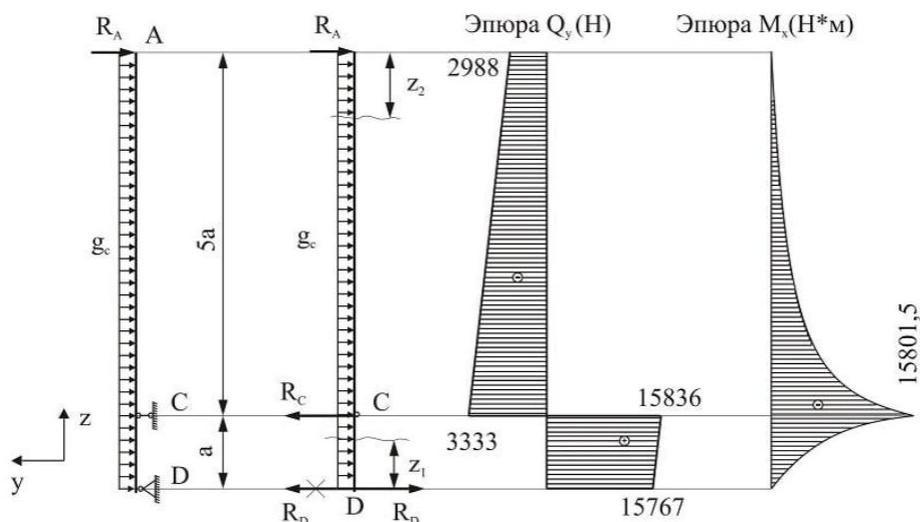


Рис. 5. Пример полученной при расчете опор ЛЭП

После произведения всех вычислений и сравнения их с нормативными значениями делается вывод о возможности или невозможности подвесить нужный нам кабель на данную опору.

### **Воздействие внешних факторов**

У воздушных линий электропередач есть свои естественные враги. Один из них — обледенение проводов. Особенно это бедствие характерно для южных районов России, однако встречается и в Беларуси. При температуре около нуля капли измороси падают на провод и замерзают на нем. Происходит образование кристаллической шапки на верхней части провода. Но это только начало. Шапка под своей тяжестью постепенно проворачивает провод, подставляя замерзающей влаге другую сторону. Рано или поздно вокруг провода образуется ледяная муфта, и, если вес муфты превысит 200 кг на метр, провод оборвется.

### **Меры борьбы с гололедом**

В качестве пассивной меры борьбы с гололедом могут использоваться различные провода повышенной прочности.

Термическое воздействие путем нагрева провода до температуры 120-130 °С, при котором происходит расплавления гололедной муфты, или путем профилактического нагрева проводов на 10-20 °С для предотвращения образования гололеда;

Термодинамическое воздействие путём предварительного разогревания до формирования подтопленной прослойки между проводом и ледяной муфтой и последующего «встряхивания проводов силой Ампера», возникающей при пропускании мощного импульса тока;

Электромеханическое воздействие путём периодического пропускания импульсов тока, вызывающих механические колебания проводов и разрушение гололедной муфты; эффективность электромеханических воздействий усиливается при таких параметрах импульсов тока, которые вызывают механический резонанс.



Рис. 6. Обледенение проводов ЛЭП

**Вибрация проводов** При обтекании проводов потоком воздуха, направленным поперек оси линии или под некоторым углом к этой оси, с подветренной стороны провода возникают завихрения. Периодически происходят отрывы ветра от провода и образование вихрей противоположного направления. В результате появляется вертикальная составляющая давления ветра. При совпадении частоты образования вихрей с одной из частот собственных колебаний натянутого провода последний начинает колебаться в вертикальной плоскости. Вибрация проводов возникает при скоростях ветра 0,6—0,8 м/с при увеличении скорости ветра увеличиваются частота вибрации и число волн в пролете.

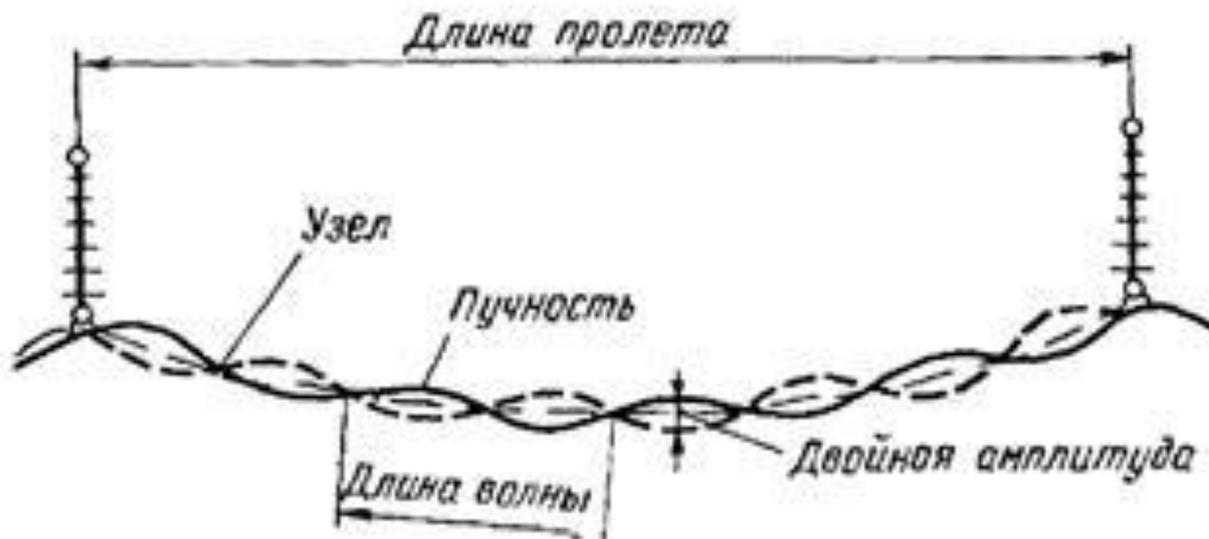


Рис. 7. Схематичное представление вибрации проводов в пролете

Опыт эксплуатации показывает, что вибрация проводов наблюдается чаще всего на линиях, проходящих по открытой и ровной местности. На участках линий в лесной и пересеченной местности продолжительность и интенсивность вибраций значительно меньше. Вибрация проводов наблюдается, как правило, в пролетах длиной более 120 м и усиливается с увеличением пролетов. Особенно опасна вибрация на переходах через реки и водные пространства с пролетами длиной более 500 м.

Опасность вибрации заключается в обрывах отдельных проволок на участках их выхода из зажимов. Эти обрывы происходят вследствие того, что переменные напряжения от периодических изгибов проволок, в результате вибрации накладываются на основные растягивающие напряжения в подвешенном проводе. Если последние напряжения невелики, то суммарные напряжения не достигают предела, при котором происходит разрушение проволок от усталости.

Для отслеживания колебаний проводов существует регистратор вибраций ALCOA "SCOLAR III", смонтированный на спиральном поддерживающем зажиме



Рис. 8. Регистратор вибраций ALCOASCOLAR III

Как правило, снижение напряжений в проводах линий до значений, при которых не требуется защиты от вибрации, экономически невыгодно. Поэтому на линиях напряжением 35 - 330 кВ обычно устанавливаются виброгасители, выполненные в виде двух грузов, подвешенных на стальном тросе.

Виброгасители поглощают энергию вибрирующих проводов и уменьшают амплитуду вибрации около зажимов. Виброгасители должны быть установлены на определенных расстояниях от зажимов, определяемых в зависимости от марки и напряжения провода.

Провода для воздушных линий передач подразделяются на виды:

- алюминиевые
- сталеалюминиевые
- медные
- изолированные
- неизолированные

Они различаются по техническим характеристикам, диапазону сечения и сфере использования.

### **Пляска проводов**

Пляска проводов, также как и вибрация, возбуждается ветром, но отличается от вибрации большой амплитудой, достигающей 12 - 14 м, и большой длиной волны. На линиях с одиночными проводами чаще всего наблюдается пляска с одной волной, т. е. с двумя полуволнами в пролете, на линиях с расщепленными проводами — с одной полуволной в пролете. В

плоскости, перпендикулярной оси линии, провод движется при пляске по вытянутому эллипсу, большая ось которого вертикальна или отклонена под небольшим углом (до  $10 - 20^\circ$ ) от вертикали.

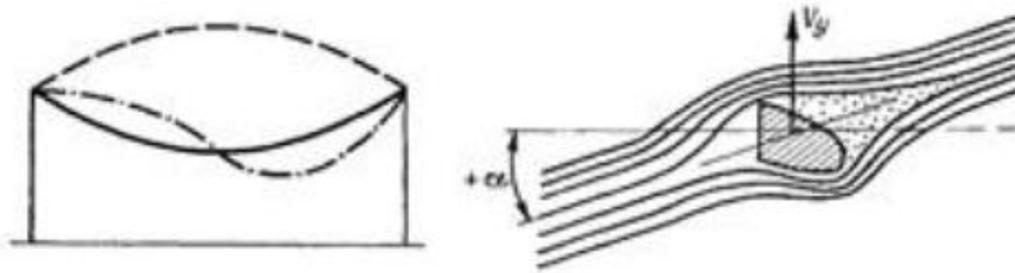


Рис. 9. Волны пляски. Слева – волны на проводе в пролете. Справа – провод покрытый гололедом в воздушном потоке друг с другом.

Как правило, пляска проводов наблюдается при гололеде. Гололед отлагается на проводах преимущественно с подветренной стороны, вследствие чего провод получает неправильную форму. При воздействии ветра на провод с односторонним гололедом скорость воздушного потока в верхней части увеличивается, а давление уменьшается. В результате возникает подъемная сила, вызывающая пляску провода.

Опасность пляски заключается в том, что колебания проводов отдельных фаз, а также проводов и тросов происходят несинхронно; часто наблюдаются случаи, когда провода перемещаются в противоположных направлениях и сближаются или даже схлестываются. При этом происходят электрические разряды, вызывающие оплавление отдельных проволок, а иногда и обрывы проводов. Наблюдались также случаи, когда провода линий поднимались до уровня тросов и схлестывались с ними.

В истории энергетики существует множество примеров аварий на ЛЭП. Периодически такие проблемы случаются из-за климатических условий, которые ведут к обрыву проводов линий передач. Одним из таких примеров в нашей стране выступает авария 29 декабря 2009 года. Так по данным Белэнерго Более 230 населенных пунктов Беларуси было обесточено из-за сильного снегопада, случившегося ночью. Наиболее пострадали от снегопада Брестская, Гомельская и Могилевская области. Отключение электричества произошло в 231 населенном пункте и на 59 фермах. Основной причиной перебоев с электроснабжением стали обрывы под тяжестью снега линий



Рис. 10. Пример аварии на ЛЭП, вызванной климатическими условиями

### **Оценка рисков природных катастроф**

Тесно взаимосвязанная европейская система магистральных линий электропередачи сгруппирована в 5 синхронных зон и управляется с помощью 41 системных операторов на территории 34 европейских государств.

Для обеспечения «режимной надёжности» при внезапных возмущениях при оперативном планировании в режиме реального времени важное значение имеет принцип N-1, с помощью которого можно определить аномальные состояния системы. К таким «возмущениям» могут относиться неожиданная авария, отказ элемента системы или множественный отказ элементов системы. Ситуации, которые приводят к отключению элементов, определяются как «случайные». В соответствии с принципом N-1, при отказе одного элемента в системе, система должна обеспечить требуемые потоки мощности и не приводить к каскадному выходу элементов из строя.

### Заключение

В заключении следует выделить несколько основных моментов. Как и любое сложной конструкции сооружение, ЛЭП имеет свои существенные проблемы, однако в современном мире решения таких проблем не представляются особо сложными, выглядя при этом крайне увлекательно. Борьба с воздействием внешних факторов на линии электропередач является областью слияния многих наук, важное место в которых занимает механика.

### Литература

1. <https://vols.expert/useful-information/raschet-nagruzok-na-oporu/>
2. <https://locus.ru/about/library/vibraciya-i-plyaska-provodov-na-vozdushnyh-liniyah-elektroper/>
3. <https://ksosvet.ru/blog/raschet-opory-lehp-dokumenty-osobennosti-obshchaya-posledovatelnost/>
4. <https://www.osce.org/files/f/documents/8/d/293556.pdf>
5. <https://www.ruscable.ru/info/pue/2-4.html>

УДК 621.

### Влияние пружины податливости при расчете двутавровой балки на ударную нагрузку

Студент гр. 11006121 Махнач Н. А., студент гр. 11001122 Гончарова Е. А.

Научные руководители – старший преподаватель Гончарова С. В.,  
старший преподаватель Хвасько В. М.

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

Расчеты конструкций на ударную нагрузку играют важную роль с практической точки зрения, однако они могут быть затруднены из-за сложности проведения экспериментов. Поэтому в практических расчетах пользуются приближенными методами, основанными на ряде упрощающих явление гипотез. Приближенные методы расчета, позволяют правильно оценить порядок перемещений, ударных нагрузок и напряжений [1].

**ЗАДАЧА.** На двутавровую балку №10, свободно лежащую на двух жестких опорах, с высотой  $h = 13$  см падает груз  $F = 1,1$  кН. Длина пролета  $l = 2,2$  м (рис. 1, а).

Требуется: