

В.А. КОТЛЯРЕВСКИЙ

**Оценка прочности
воздушных линий
электропередач, подвесных
энергетических систем и
трубопроводов**

**Методы и алгоритмы
прочностных расчетов**

**Москва
Издательство Нобель Пресс**

УДК 62-63
ББК 30.6
В11

В.А. КОТЛЯРЕВСКИЙ
В11 Оценка прочности воздушных линий электропередач, подвесных энергетических систем и трубопроводов: Методы и алгоритмы прочностных расчетов / В.А. КОТЛЯРЕВСКИЙ – М.: Lennex Corp, — Подготовка макета: Издательство Нобель Пресс, 2013. – 57 с.

ISBN 978-5-518-42605-4

Представлены методы, алгоритмы и данные программных средств прочностных расчетов различных подвесных систем в сложных геологических и климатических условиях. Для прогнозирования возможного аварийного ущерба и принятия мер повышения эксплуатационной безопасности.

ISBN 978-5-518-42605-4

© Издательство Нобель Пресс, 2013
© В.А. КОТЛЯРЕВСКИЙ, 2013

В. А. Котляревский

**ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ
ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ, ПОДВЕСНЫХ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ТРУБОПРОВОДОВ**

V. Kotlyarevsky

**ESTIMATION OF DURABILITY OF OVERHEAD
POWER LINES, SUSPENDED ENERGY SYSTEMS
AND PIPELINES**

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	4
Глава 1. Расчет прочности воздушных линий электропередач и нагрузки на опоры	5
1.1. Теория подвешенных нитей	5
1.2. Прочность проводов, тросов и самонесущих кабелей линий электропередач	9
1.2.1. Аварийный режим работы	12
1.2.2. Нормальный режим при сочетаниях условий с ветровыми и гололедными нагрузками. Нагрузки на опоры	14
Основные обозначения	22
Глава 2. Энергетические сейсмостойкие подвесные системы	24
2.1. Расчетная схема сооружения и система уравнений	24
2.2. Программа DEMR	31
2.3. Задание сейсмических нагрузок	33
2.4. Расчет сооружения с подвесным агрегатом	35
Основные обозначения	39
Глава 3. Магистральные трубопроводы, провисающие над полостями со структурно неустойчивыми грунтами	40
3.1. Формулировка метода	40
3.2. Реализация метода для конкретных схем	42
3.3. Вариантные расчеты по схеме рис. 3.1,а	45
3.4. Вариантные расчеты по схеме рис. 3.1,б	48
Основные обозначения	50
Глава 4. Тросовая подвеска трубопроводов через препятствия	51
4.1. Реализация метода	51
4.2. Вариантные расчеты	53
Основные обозначения	55
Литература	56

ПРЕДИСЛОВИЕ

Аварии на различных объектах часто являются следствием неблагоприятных соотношений интенсивности поражающих факторов и защитных свойств объектов, то есть способности противостоять их действию. Чтобы принять меры по снижению риска потерь, такие соотношения могут быть спрогнозированы посредством физического или математического моделирования аварийных сценариев.

В книге предпринята попытка представить в доступной для инженера форме методы и средства оценки ресурсов прочности воздушных линий электропередач, подвесных энергетических систем и магистральных трубопроводов, провисающих над полостями со структурно неустойчивыми грунтами, а при переходах через препятствия – также подвешенных на тросах. Приведены формулировки и расчетные алгоритмы соответствующих задач. Математическое моделирование осуществляется с применением программных средств решения уравнений, содержащих соотношения математических моделей конструкционных материалов, сред и воздействий, отражающих их свойства, наблюдаемые в экспериментах.

В методах оценки прочности воздушных линий и трубопроводного транспорта нефтепродуктов в реальных условиях эксплуатации учтены различные воздействия, связанные со сложными геологическими и климатическими условиями (температурные перепады, ветровые и гололедные нагрузки), а для подвесных агрегатов энергетических систем – сейсмические воздействия.

Приведенные примеры расчета и таблицы могут быть использованы при проектировании и прогнозирования последствий аварий рассмотренных объектов. Представленные подробные алгоритмы также послужат в качестве основы программной поддержки разработки паспортов и деклараций безопасности опасных производственных объектов.

Книга будет полезна для студентов ВУЗов, слушателей военных академий и университетов. Может быть использована в штабах гражданской обороны, страховыми организациями в целях прогноза вероятного ущерба и степени риска аварий на предприятиях, инженерно-техническим персоналом и научными сотрудниками проектных и научно-исследовательских организаций.

Глава 1. Расчет прочности воздушных линий электропередач и нагрузки на опоры

Механический расчет подвешенных нитей применим к оценке прочности подвесных мостов и других конструкций, воздушных линий электропередач, нагрузок на опоры подвесных систем.

Представленный алгоритм позволяет в целях программной поддержки проектирования вести механический расчет нагруженных проводов, тросов и самонесущих кабелей при температурных перепадах в широком диапазоне параметров, а также составлять компактные таблицы для оперативного прогноза напряженно - деформированного состояния и ресурса прочности воздушных линий электропередач (ВЛ).

Далее рассмотрен расчет закрепленной по концам однопролетной нити, нагруженной поперечными статической и ветровой нагрузками. Расчетный алгоритм реализован в программе ТРОС, применительно к анализу прочности воздушных линий электропередач [1–3].

1.1. Теория подвешенных нитей

Нить с двумя точками подвеса на одном уровне, расстояние между которыми – пролет L , провисает симметрично относительно вертикальной оси, проходящей через центр пролета. Подвеску (условно разгруженной) нити осуществляют с заданной величиной начального провеса f_0 , который в частном случае может отсутствовать ($f_0 = 0$). Под действием поперечной нагрузки q , равномерно распределенной на горизонтальной проекции (по координате z с началом в левой опорной точке), нить растягивается, провес возрастает на величину прогиба Δf , и суммарное значение провеса $f = f_0 + \Delta f$.

Приближенное значение продольного растягивающего напряжения σ_N в провисающей нити с площадью поперечного сечения F оценивают, опуская влияние изгибной жесткости, как для пологой упругой нити ($f/L \leq 1/5$). Нить под нагрузкой работает только на растяжение, усилие в каждом сечении направлено по касательной к нити. Составляющие усилия в точках подвеса – горизон-

тальная (распор H) и вертикальная (реакции A). Принимается, что под нагрузкой форма провисания нити параболическая¹

$$y = a z^2 + b z, \quad a = -4f/L^2, \quad b = 4f/L.$$

При начальном провесе $f_0 > 0$ длина S_0 условно разгруженной нити

$$S_0 = L \left[1 + \frac{8}{3} (f_0/L)^2 - \frac{32}{5} (f_0/L)^4 \right] \approx L \left[1 + \frac{8}{3} (f_0/L)^2 \right],$$

а длина S под нагрузкой – по данной формуле с заменой f_0 на полный провес f . Относительное удлинение ε равно

$$\varepsilon = (S - S_0)/S_0 = \frac{8}{3} (f^2 - f_0^2)/(S_0 L). \quad (1.1)$$

Здесь стрела провеса (прогиб) f и деформация ε – величины, соответствующие равномерным воздействиям.

В общем случае суммарная поперечная нагрузка q на нить, наклоненную действием ветра, складывается из вертикальной нагрузки G от собственного веса q_0 и возможной пригрузки P_p (для воздушных линий, например зимой, – гололедом) и горизонтальной ветровой нагрузкой P_w . Наклон α_T нити от ветрового воздействия

$$\alpha_T = \arctg(G/P_w), \quad G = q_0 + P_p, \quad (1.2)$$

и суммарная расчетная поперечная нагрузка с учетом наклона

$$q = G/\cos \alpha_T = \sqrt{G^2 + P_w^2}. \quad (1.3)$$

Распор определяется из уравнения прогибов нити (в плоскости с ветровым наклоном)

$$\frac{d}{dz} \left(H \frac{dy}{dz} \right) = q,$$

и при $H = \text{const}$ – из уравнения

$$d^2 y/dz^2 = q/H.$$

¹ В расчетах используют также более точную аппроксимацию уравнением цепной линии $y = a \operatorname{ch}(z/a) = \frac{1}{2} a [\exp(z/a) + \exp(-z/a)]$ длиной $S = 2a \cdot \operatorname{sh}(L/a)$ ($a = H/q$ – параметр с размерностью длины).

Двойным интегрированием с учетом граничных условий $y(0) = y(L) = 0$ получаем функцию $y(z) = \frac{q}{2H} z^2 - \frac{qL}{2H} z$, которая при $z = L/2$ дает зависимость горизонтального натяжения нити (тяжения) в точках подвеса (распора) H от стрелы наклонного провисания $f = y_{\max}$

$$H = qL^2 / (8f).$$

Относительная деформация нити ε_q

$$\varepsilon_q = \frac{H}{FE} = \frac{qL^2}{8FEf}.$$

Влияние нагрева (охлаждения) нити учитывают зависимостью ее относительной деформации от температурного перепада – изменения температуры $T = T_2 - T_1$

$$\varepsilon_T = \frac{1}{L} \int_0^L \alpha T(z) dz,$$

где α – коэффициент температурного линейного расширения материала, 1/град.

При $T(z) = \text{const}$ имеем²

$$\varepsilon_T = \alpha T.$$

Деформация нити равна сумме деформаций ε_Σ от нагрузки ε_q и от прогрева ε_T

$$\varepsilon_\Sigma = \varepsilon_q + \varepsilon_T = qL^2 / (8FEf) + \alpha T. \quad (1.4)$$

Приравнивая значения деформаций по (1.1) и (1.4), получим уравнение для относительного полного провеса $\xi = f/L$:

$$\xi^3 - a_1 \xi - a_2 = 0 \quad (1.5)$$

² При нагреве в интервале температур от 0 до 75° С для стали принимают $\alpha = 1,21 \cdot 10^{-5}$ 1/град. Более точно деформацию стальной нити от нагрева определяют по формуле $\varepsilon_t = aT + bT^2$, $a = 1,17 \cdot 10^{-5}$ 1/град., $b = 4,7 \cdot 10^{-9}$ 1/градус².

с безразмерными коэффициентами $a_1 = (f_0/L)^2 + \frac{3}{8}\alpha T S_0/L$, $a_2 = \frac{3}{64}q S_0/(EF)$.

Максимум напряжения в опорных сечениях от распора $\sigma = H/F_k$. Учитывая значения реакций $A = \frac{1}{2}qL$, максимум напряжения в опорных сечениях нити

$$\sigma_m = \frac{1}{F_k} \sqrt{H^2 + A^2}. \quad (1.6)$$

Решение уравнения (1.5) может быть представлено в зависимости от безразмерных параметров (инвариантов), характеризующих начальный провес $\xi_0 = f_0/L$, температурный перепад $\xi_T = \alpha T$, на-грузку и данные нити $\xi_{qL} = qL/(EF_k)$:

$$\xi = \xi(\xi_0, \xi_T, \xi_{qL}) \quad (1.7)$$

с коэффициентами

$$a_1 = \xi_0^2 + \frac{3}{8}\xi_T(1 + \frac{8}{3}\xi_0^2), \quad a_2 = \frac{3}{64}\xi_{qL}(1 + \frac{8}{3}\xi_0^2).$$

Распор в безразмерном виде $\eta = H/(EF) = \varepsilon$

$$\eta = \eta(\xi_{qL}, \xi) = \frac{1}{8}\xi_{qL}/\xi.$$

В частных случаях при $f_0=0$ имеем $S_0=L$, $a_1 = \frac{3}{8}\alpha T$, $a_2 = \frac{3}{64}qL/(EF)$, и при нулевом температурном перепаде $T=0$ $a_1=0$, и относительный прогиб равен

$$\xi = \frac{1}{4}\sqrt{3qL/(EF)}.$$

Решение уравнения (1.5) осуществляется численным методом по разработанной программе «ТРОС». Чтобы учесть постепенное изменение температурного перепада, вводится функция изменения разности температур со временем. При этом уравнение решается шаговым методом с определением значений провеса в последовательные моменты времени с заданным шагом.

Остаточный ресурс прочности R_S при $\sigma < \sigma_{\text{ГР}} = R_k/F_k$ определяется по суммарному разрывному усилию R_k (для троса – всех проволок) и расчетной площади F_k (всех проволок):

$$R_s = 1 - \sigma / \sigma_{\text{ГР}} .$$

1.2. Прочность проводов, тросов и самонесущих кабелей линий электропередач

По программе ТРОС осуществляется моделирование напряженно-деформированного состояния проводов, тросов и самонесущих кабелей в различных эксплуатационных условиях с выдачей значений провесов и тяжений с контролем ресурса прочности ВЛ. Учитываются начальный провес от собственного веса и вытяжки при эксплуатации, от гололедных отложений и других вертикальных нагрузок, от температурных перепадов (в частности, с организацией плавки гололеда) и от действие ветра. Значение температурного перепада T представляет разность температур: текущей T_T и начальной T_0 (при строительстве). Значением T_T учитывается текущая температура воздушной среды и температура плавки гололеда.

Исходная информация и результирующие функции представимы как в размерном, так и в инвариантном виде. Во втором случае минимизировано число (безразмерных) исходных данных, и результаты позволяют формировать компактные таблицы, удобные при поддержке проектирования.

Применительно к механическому расчету воздушных линий в алгоритме учтена система коэффициентов в формулах для нормативных и расчетных нагрузок и воздействий по ПУЭ-7 [4, 5]. Чтобы подчеркнуть расчет ВЛ далее введем для нити конкретный термин – трос.

В общем случае трос может находиться под действием равномерно распределенной поперечной нагрузки (собственный вес, гололедные отложения), температурного перепада и ветра. Определяются тяжение наклоненного ветром троса и расчетные нагрузки на опоры от тяжения с учетом возможной пульсационной компоненты и гололедных отложений.

В связи с большим числом возможных нагрузок в различных эксплуатационных условиях введем к собственному весу троса q_k коэффициент нагрузки k , которым можно учесть догрузку от веса кабеля волокноно-оптической линии связи, гололедных отложений, снега и др. То есть возможные варианты погонной нагрузки

можно представить в виде $q_{\Sigma} = k \cdot q_k$ ($k = 1, 2, 3, \dots$). При $k = 1$ нагрузка соответствует весу троса.

Для приводимых далее результатов вариантных расчетов использованы характеристики некоторых стальных канатов по табл. 1.1, в которой d_k – диаметр каната, F_k – расчетная площадь всех проволок в канате, m_k – погонная масса смазанного каната, q_k – погонный вес, R_k – суммарное разрывное усилие всех проволок в канате.

Для несущих закрытых стальных оцинкованных витых канатов с металлическим сердечником и предварительной вытяжкой по ГОСТ 14-4-1216-82 (в зависимости от кратности свивки от 6 до 16) модуль упругости $E_k = 1,18 \cdot 10^5 - 1,77 \cdot 10^5$ МПа. Коэффициент $\alpha = 1,21 \cdot 10^{-5}$ 1/град.

Таблица 1.1. Сортамент стальных канатов

d_k , мм	F_k , мм ²	m_k , кг/м	q_k , Н/м	R_k , МН	σ_k , МПа	Нормы
10	60,35	0,519	5,091	0,0798	1322,3	ГОСТ 3063-80*
16	153,84	1,32	12,95	0,2025	1316,3	ГОСТ 3063-80*
20,5	192,11	1,765	17,31	0,2555	1329,97	ГОСТ 1454-80
32	688,9	6,057	59,42	0,9820	1425,416	ТУ 14-4-1216-82
36	589,81	5,410	53,07	0,6870	1164,78	ГОСТ 1454-80
42	1227,9	10,86	106,54	1,6680	1358,38	ТУ 14-4-1216-82
52	1347,99	11,79	115,66	1,6530	1226,27	ТУ 14-4902-78
62	2703,5	23,85	233,97	3,5486	1312,587	ТУ 14-4-1216-82
72	3631,0	32,09	314,80	4,7295	1302,5823	ТУ 14-4-1216-82

Объем выдачи результатов расчета показан на следующем примере при заданных нагрузках.

Пример 1. Оценка ресурса прочности троса с данными: $L = 300$ м; $d = 52$ мм; $f_0 = 9$ м; $P_w = 750$ Н/м; $P_p = 250$ Н/м; $\Delta T = -5$ град.

При расширенном диапазоне температурного перепада получены результаты слабо отличающиеся от приведенных. При $T = -40$ град.: прогиб 4,46 м; тяжение 697 кН; ресурс прочности 57,1 %. При $T = +70$ град.: прогиб 5,71 м; тяжение 638 кН; ресурс прочности 60,7 %.

Встроенный в программу банк данных содержит стандартную информацию по проводам и тросам, необходимую для механического расчета и полная номенклатура коэффициентов определения нормативных и расчетных нагрузок и воздействий. Эта информа-