

В.Я. Горин, Н.Н. Давидсон

(г. Донецк, Донецкий национальный технический университет)

V.Ya. Gorin, N.N. Davidson (Donetsk, Donetsk National Technical University)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УЧЕБНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ САПР ВОЗДУШНЫХ ЛЭП ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КРИВОЙ ПРОВИСАНИЯ ПРОВОДА

USE OF THE EDUCATIONAL AND RESEARCH CAD OF TRANSMISSION LINES IN THE STUDY OF MATHEMATICAL MODEL OF THE WIRE SAG CURVE

Рассматриваются результаты разработок по совершенствованию учебно-исследовательского варианта системы автоматизированного проектирования воздушных линий электропередачи высокого и сверхвысокого напряжения. На базе последней предложенной версии структурной схемы УИ САПР ВЛ в результате проведенных разработок получены новые расчетные соотношения для проведения систематического механического расчета проводов (тросов) ВЛ. Выполнены численные расчеты параметров модели кривой провисания провода на большом переходе ВЛ с использованием различных теорий.

The results of developments to improve the educational and research version of the computer-aided design of overhead power lines of high and ultrahigh voltage are considered. On the basis of the latest proposed version of the structural scheme of the educational and research CAD of overhead lines, as a result of the conducted developments, new calculated ratios for the systematic mechanical calculation of overhead wires (cables) are obtained. Numerical calculations of the parameters of the model of the slack curve of the overhead line wire are performed using various theories. Numerical calculations of the parameters of the wire SAG curve model at a large overhead line transition are performed using various theories.

Ключевые слова: САПР, учебно-исследовательский вариант, проектирование воздушных линий электропередачи, механический расчет проводов, новые расчетные соотношения, численные расчеты, сравнительный анализ результатов.

Keywords: CAD, educational and research version, design of transmission lines, mechanical calculation of overhead wires, new calculated ratios, numerical calculations, comparative analysis of results.

На кафедре электрических систем Донецкого национального технического университета продолжается проведение работ по совершенствованию процесса автоматизированного проектирования воздушных ЛЭП (ВЛ) высокого (ВН) и сверхвысокого (СВН) напряжения на базе учебно-исследовательской САПР (УИ САПР ВЛ). По сравнению с

опубликованной в [1] структурной схемой УИ САПР ВЛ ВН и СВН версия, приведенная на рис.1, была построена на модульном принципе и успешно использована в разработках новых подходов при проектировании больших переходов ВЛ через водные пространства [2].

Сегодня нами предлагается модульная версия 0.5 структурной схемы УИ САПР ВЛ, отражающая новые подходы к выполнению проектных расчетов больших переходов. В этой версии предусматривается отдельный, так называемый «систематический» (механический), расчет проводов и тросов на большом переходе ВЛ (см. рис. 1), выполняемый по предложенным в [3] соотношениям.

Целью настоящей работы является исследование и уточнение основного уравнения состояния провода ВЛ, которое является фундаментальным в расчетах механической прочности проводов (тросов) ВЛ с использованием УИ САПР ВЛ.

Задачи, решаемые в работе, можно сформулировать следующим образом:

1) Предложить новые математические соотношения, которые являются более строгими по сравнению с общепринятыми приближенными формулами для расчета параметров больших переходов ВЛ ВН и СВН через водные пространства.

2) Проанализировать результаты численных расчетов геометрических параметров кривой провисания провода ВЛ при использовании различных математических теорий.

Для решения первой задачи проанализируем геометрическую интерпретацию кривой провисания провода в пролете (большом переходе) ВЛ (см. рис.2).

Как известно, производная от параболы

$$f'(x) = \operatorname{tg} \alpha(x) = \frac{dy}{dx} = \frac{\gamma x}{\sigma}.$$

При малых значениях x $\operatorname{tg} x \approx x$.

С математической точки зрения особого рассмотрения требует вопрос о существовании математической модели кривой, удовлетворяющего следующему выражению:

$$y' = f'(x) = \operatorname{tg} \frac{\gamma x}{\sigma}.$$

Используем известную в математике теорию определения тригонометрических функций с помощью обращения интегралов. Согласно этой теории сначала определяют обратные тригонометрические функции, а затем тригонометрические функции, в свою очередь им обратные.

При построении теории будем исходить из интеграла

$$A_T(x) = \int_0^{\infty} \frac{dz}{1+z^2}.$$

Несобственный интеграл $\int_0^{\infty} \frac{dz}{1+z^2}$ сходится. Функция $A_T(x)$

определена во множестве всех действительных чисел. Она может служить средством аналитического определения необходимых нам значений $\arctg z$, а затем и \arctg параметра z . Тогда будем иметь следующие табличные интегралы [4]:

$$\int_0^{\infty} \arctg z \cdot dz = -\ln \cos z + C ;$$

$$\int \sqrt{1 + \arctg^2 z} dz = \int \frac{dz}{\cos z} = \ln \arctg \left(\frac{z}{2} + \frac{\pi}{4} \right) + C .$$

Напомним, что используемый нами метод механического расчета провода ВЛ с целью определения его механической прочности основан [3] на теории провисания гибкой нити, в каждом поперечном сечении которой напряжения одинаковы. Кривая провисания такой нити (рис. 2) принимает форму цепи равного сопротивления растяжению. Цепью равного сопротивления называется цепь переменной толщины, у которой толщина в каждой точке пропорциональна натяжению T (рис. 3). Заметим, что у такой цепи вероятность разрыва во всех точках одинакова.

Рассмотрим равновесие отрезка гибкой нити OD , где точка O будет самой низкой, а точка D — произвольной точкой в правой части нити. Эта точка находится под действием трех сил: натяжения H в точке O , натяжения T в точке D и вертикальной нагрузки Q (рис. 3). Эти три силы образуют замкнутый так называемый «силовой» треугольник, в котором

$$\arctg \theta = \frac{dy}{dx} = \frac{Q}{H}, \quad (1)$$

где H — натяжение в самой низкой точке цепи.

Обозначим буквой S переменное сечение цепи, изменяющееся вдоль её длины. Если обозначить вес единицы объема цепи через γ , а её длину через L , то вес элемента dL равен $\gamma S dL$.

Точно так же приращение вертикальной нагрузки составит

$$dQ = \gamma S dL,$$

а напряжение цепи (согласно условию) будет пропорционально толщине цепи, т.е.

$$T = \sigma S,$$

где σ — напряжение в материале провода.

Вычисляя дифференциал от обеих частей равенства $\frac{dy}{dx} = \frac{Q}{H}$, находим

$$dy' = \frac{dQ}{H} = \frac{\gamma S}{H} dL. \quad (2)$$

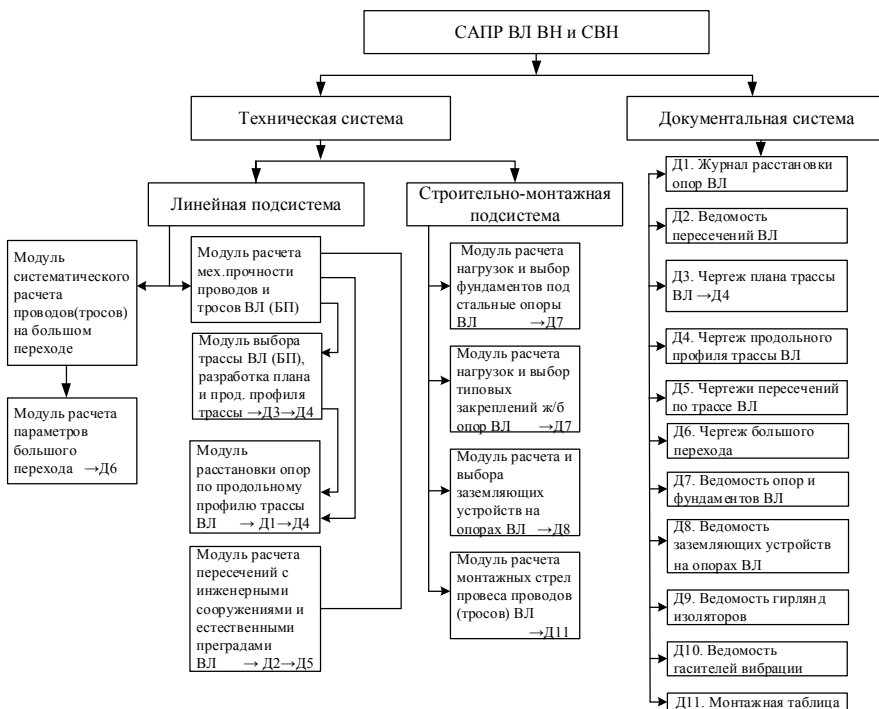


Рис.1. Структурная схема УИ САПР ВЛ (версия 0.5)

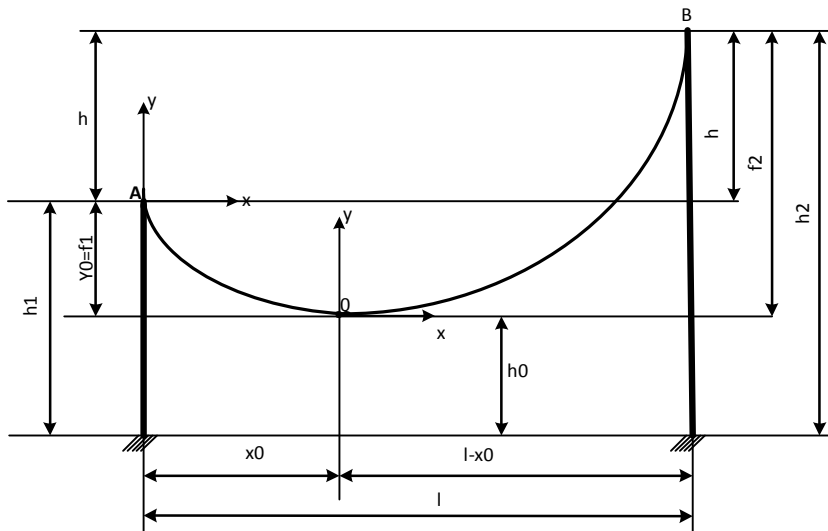


Рис. 2. Кривая провисания провода

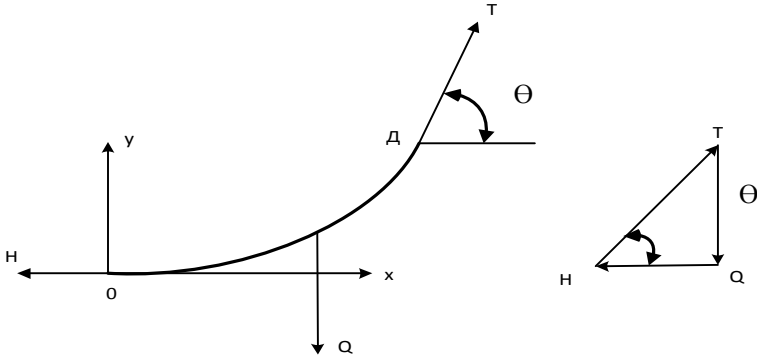


Рис. 3. Элемент провода

С другой стороны, так как на цепь действует только вертикальная нагрузка, проекция натяжения на горизонтальную ось является постоянной и равной

$$H = T \frac{dx}{dL} = \sigma S \frac{dx}{dL} = const.$$

Отсюда $S = \frac{H}{\sigma} \frac{dL}{dx}$, значение которого вводим в уравнение (2) и находим:

$$dy' = \frac{\gamma}{\sigma} \frac{dL \cdot dx}{dx} = \frac{\gamma}{\sigma} (1 + y'^2) dx,$$

где учтено, что

$$dL = \sqrt{(1 + y'^2)} dx.$$

Разделяя переменные, получим

$$\frac{dy'}{1 + y'^2} = \frac{\gamma}{\sigma} dx.$$

Интегрируя это выражение, имеем

$$\arctg y' = \frac{\gamma}{\sigma} x + C_1.$$

Начало координат выбрано в самой низкой точке кривой провисания провода ВЛ. Следовательно, при $x = 0$: $y' = 0$ и $C_1 = 0$.

Итак, $y' = tg \left(\frac{\gamma}{\sigma} x \right)$. $dy = tg \left(\frac{\gamma}{\sigma} x \right) dx$. (4)

Интегрируя, находим $y = -\frac{\gamma}{\sigma} \ln \cos \left(\frac{\gamma}{\sigma} x \right) + C_2$.

При $x = 0$: $y' = 0$ и $C_2 = 0$. Тогда стрела провеса провода может быть вычислена по следующему выражению:

$$y = -\frac{\gamma}{\sigma} \ln \cos \left(\frac{\gamma}{\sigma} x \right). \quad (5)$$

Длина провода в пролете ВЛ может быть определена [3] по следующей формуле с использованием общеизвестных тригонометрических соотношений $\cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha = 1$, $\cos^2 \alpha (1 + \frac{\sin^2 \alpha}{\cos^2 \alpha}) = 1$, $\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha} = \frac{1}{\cos \alpha}$:

$$L = \int_a^b \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 ax} \, dx = \int_a^b \frac{dx}{\cos ax}.$$

Из таблицы неопределенных интегралов [4] воспользуемся соотношением

$$\int \frac{dx}{\cos ax} = \int \sec ax \, dx = \frac{1}{a} \ln \operatorname{tg} \left(\frac{ax}{2} + \frac{\pi}{4} \right).$$

Следовательно, длина провода в пролете ВЛ может быть определена по следующему достаточно простому выражению:

$$L = \frac{\sigma}{\gamma} \left[\ln \operatorname{tg} \left(\frac{\gamma}{\sigma} \frac{x_0}{2} + \frac{\pi}{4} \right) + \ln \operatorname{tg} \left(\frac{\gamma}{\sigma} \frac{(l-x_0)}{2} + \frac{\pi}{4} \right) \right]. \quad (6)$$

В результате предлагается основное уравнение состояния провода в следующем виде:

$$\frac{\sigma_2}{\gamma_2} \left[\ln \operatorname{tg} \left(\frac{\gamma_2}{\sigma_2} \frac{x_{02}}{2} + \frac{\pi}{4} \right) + \ln \operatorname{tg} \left(\frac{\gamma_2}{\sigma_2} \frac{(l-x_{02})}{2} + \frac{\pi}{4} \right) \right] = L_1 [1 + \alpha (t_2 - t_1)] \cdot [1 + \beta (\sigma_2 - \sigma_1)]; \quad (7)$$

где

$$L_1 = \frac{\sigma_1}{\gamma_1} \left[\ln \operatorname{tg} \left(\frac{\gamma_1}{\sigma_1} \frac{x_{01}}{2} + \frac{\pi}{4} \right) + \ln \operatorname{tg} \left(\frac{\gamma_1}{\sigma_1} \frac{(l-x_{01})}{2} + \frac{\pi}{4} \right) \right].$$

По формулам (5), (6) определяются величины стрел провеса и длин провода. Из уравнения состояния провода (7) определяем величину напряжения в проводе, где индексами 1,2 обозначены параметры исходного и расчетного режимов соответственно.

С целью обобщения результатов расчета параметров больших переходов ВЛ через водные преграды при различных формах кривой провисания провода ВЛ были проведены соответствующие расчеты величин стрел провеса f и длины провода L на большом переходе длиной 1 400 м (рис. 4).

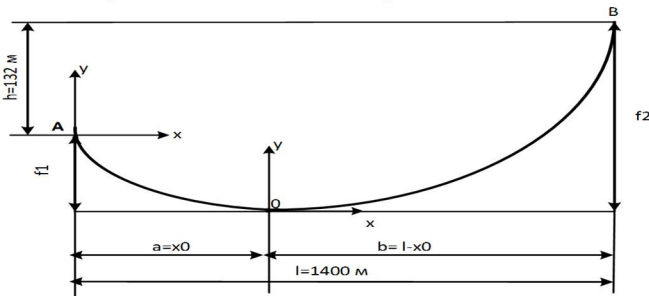


Рис. 4. К расчету большого перехода ВЛ

Таблица. Результаты численных расчетов параметров большого перехода ВЛ

Форма кривой провисания провода \ Параметр (м)	f_1	f_2	a	b	L
Парабола	64,00	196,00	509,090	890,910	1433,97
Цепная линия	65,36	197,36	513,698	886,902	1434,14
Цепь равного сопротивления растяжению	66,80	198,84	517,260	882,740	1435,09

Как видно из приведенной таблицы, стрелы провеса провода на переходе и, как следствие, длина провода, имеют наибольшие значения при расчетах по формулам, полученным в настоящей работе на базе теории цепи равного сопротивления растяжению провода. Этот факт является по нашему мнению позитивным и объясняется следующим образом. Согласно теории сопромата, теории упругости и теории пластичности стрела провеса провода и должна быть по величине больше, чем рассчитанные по основному уравнению состояния провода, в котором не учитывается изменение тяжения по длине провода и пластичные свойства материала провода.

Список литературы

1. Горин, В.Я. Новые подходы при совершенствовании учебно-исследовательской САПР воздушных ЛЭП высокого и сверхвысокого напряжения/В.Я. Горин., Н.Н. Давидсон, Р.И. Пуриши // САПР и моделирование в современной электронике [Текст] + [Электронный ресурс]: сб. науч. тр. II Междунар. науч.-практ. конф. / под ред. Л.А. Потапова, А.Ю. Дракина. – Брянск: БГТУ, 2018. – Ч.1. – С.27-33.
2. Куленёнок, И.А. Новый подход при проектировании больших переходов воздушных ЛЭП через водные пространства/ И.А. Куленёнок, В.Я. Горин, Н.Н. Давидсон //Инновационные перспективы Донбасса, г. Донецк, 21-23 мая 2019 г. – Т.2: 2. Перспективы развития электротехнических, электромеханических и электросберегающих систем. – 2019. – С. 41- 45.
3. Горин, В.Я. Новая методика расчета параметров больших переходов воздушных ЛЭП/ В.Я.Горин, Н.Н. Давидсон // Наук.праці ДонНТУ, серія «Електротехніка і енергетика», випуск 79 . – Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2004. – С.74 -77.
4. Бронштейн, И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов/И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев//Изд. девятое, стереотипное. – М.: Госуд. изд.физ.- мат. литер. 1962. – 608 с.

Материал поступил в редколлегию 24.10.19.