

УДК 621.332.3

Д. В. ШКОРОЕДОВ, Д. А. ЧЕРНОУС, кандидат технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

## ВАРИАНТ РАСЧЕТА СИЛОВОЙ НАГРУЖЕННОСТИ ДВУХТЯГОВОГО КРОНШТЕЙНА ЛЭП

Разработана расчетная методика определения силовой нагруженности двухтягового кронштейна КПСИП-3, основанная на использовании уравнений статики твердого тела и допущении о недеформируемости балки кронштейна. В отличие от традиционных методов механики материалов данная методика позволяет получить относительно простые аналитические соотношения для реакций связей и провести многопараметрический анализ силовой нагруженности кронштейна в процессе эксплуатации. Установлены зависимости сил в креплениях кронштейна и внутреннего момента в балке от значений одного из конструктивных параметров. Результаты расчетов сопоставлены с данными, полученными при использовании метода сил для раскрытия статической неопределенности.

**В**ведение. Одним из элементов креплений воздушных линий электрических передач являются кронштейны. В настоящее время всё более широко начинают применяться кронштейны, изготовленные из композитных материалов на основе полимеров [1]. Эти конструкции часто для краткости называют полимерными кронштейнами. В частности, на железнодорожном транспорте для поддержания и изоляции проводов воздушных линий электропередачи устройств сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ) и линии продольного электроснабжения (ПЭ) напряжением 6–10 кВ используются кронштейны серии КПСИП [2]. В этих устройствах балка кронштейна и тяги выполнены из профильного электроизоляционного стеклопластика. На рисунке 1 представлен схематичный чертеж кронштейна КПСИП-3, предназначенного для крепления трех проводов. Наиболее распространенный вариант изготовления кронштейна подразумевает крепление «малой» тяги в точке подвеса внутреннего провода. Однако, как будет показано в дальнейшем, такое крепление не является оптимальным с точки зрения минимизации механических нагрузок.

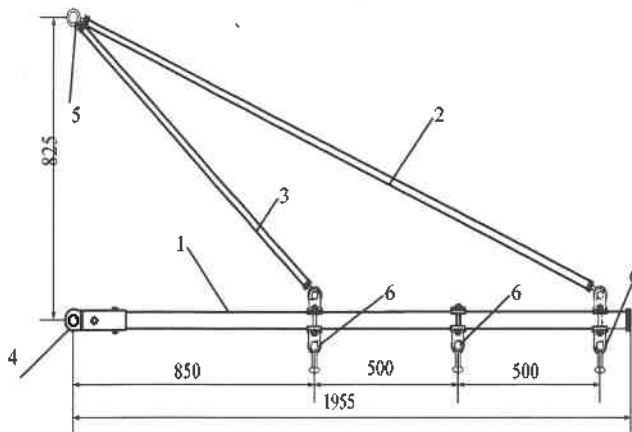


Рисунок 1 – Схематичный чертеж кронштейна КПСИП-3. 1 – балка кронштейна; 2 – «большая» тяга; 3 – «малая» тяга; 4 – крепление балки кронштейна к опоре ЛЭП; 5 – крепление тяг к опоре ЛЭП; 6 – устройства крепления проводов ЛЭП к балке кронштейна

Полимерные кронштейны превосходят традиционно используемые стальные аналоги по электроизоляционным показателям, себестоимости, технологичности изготовления и эксплуатации, устойчивости к

негативным климатическим воздействиям. Однако показатели механических жесткости и прочности материалов полимерного кронштейна ниже соответствующих значений для сталей. Поэтому при возрастании ветровой или гололедной нагрузок происходит излом балки кронштейна КПСИП-3 или разрыв одной из тяг [3]. Данное обстоятельство обуславливает актуальность оптимизации конструкции полимерного кронштейна с целью снижения его силовой нагруженности. Подобная оптимизация требует разработки расчетной методики, позволяющей с приемлемой точностью прогнозировать значения деформационно-прочностных показателей кронштейна во всём возможном диапазоне изменения значений конструктивных параметров. Расчет на прочность двухтягового кронштейна усложняется тем, что система сил, действующих на его балку, является статически неопределимой. Для раскрытия неопределенности можно использовать один из трех подходов.

1 Подход, основанный на классических методах механики материалов (методе сил или перемещений) [4]. Преимущество данного подхода состоит в учете процесса изгиба балки кронштейна. Недостатком этого подхода является громоздкость аналитических соотношений и трудоемкость реализации при произвольном значении геометрических параметров.

2 Подход, основанный на построении и анализе численной математической модели рассматриваемой конструкции. При этом задача теории упругости для данной конструкции решается одним из численных методов, в частности, методом конечных элементов [5]. Численные модели позволяют не только учесть деформативность всех элементов кронштейна, но и производить расчеты без упрощений геометрии конструкции. Однако использование этого подхода для поиска оптимальных значений геометрических параметров конструкции сопряжено с существенным повышением трудоемкости процесса оптимизации.

3 Подход, основанный на допущении о том, что балка кронштейна является абсолютно жестким телом. При этом для раскрытия статической неопределенности используется метод возможных перемещений и закон Гука для тяг. В рамках данного подхода используются только соотношения статики твердого тела [6].

В известных научных публикациях для прочностного расчета кронштейнов используются только первый [7] или второй [2] из описанных подходов. Вместе с тем аналитические соотношения для действующих на балку кронштейна сил и моментов, получаемые в рамках третьего подхода, позволяют существенно упростить процесс установления оптимальных значений геометрических параметров рассматриваемой конструкции.

В связи с вышесказанным, целью настоящего исследования является разработка упрощенной методики расчетного определения показателей силовой нагруженности двухтягового полимерного кронштейна КПСИП-3, основанной на допущении о недеформируемости балки кронштейна.

#### Расчетная методика

На рисунке 2 представлена расчетная схема кронштейна КПСИП-3. Здесь введены обозначения:  $G$  – нагрузка от силы тяжести провода;  $F$  – сила аэродинамического сопротивления;  $R_y, R_x$  – компоненты реакции в точке крепления кронштейна к опоре;  $T_y, T_x$  – компоненты силы натяжения в тросах. Значения расстояний, указанных на рисунке 2, приведены в таблице 1 и соответствуют конструкции кронштейна (см. рисунок 1). Для компонент  $T_{1y}, T_{1x}, T_{2y}, T_{2x}$  сил в тросах выполняются соотношения

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{T_{1y}}{T_{1x}} = \frac{H}{d}, \quad \operatorname{tg} \beta = \frac{T_{2y}}{T_{2x}} = \frac{H}{a+2b}. \quad (1)$$

Здесь  $H$  – расстояние между точками крепления кронштейна и тяги к опоре.

Таблица 1 – Геометрические параметры расчетной схемы кронштейна КПСИП-3

Параметр	$a$	$b$	$H$	$h$
Значение	850	500	825	10

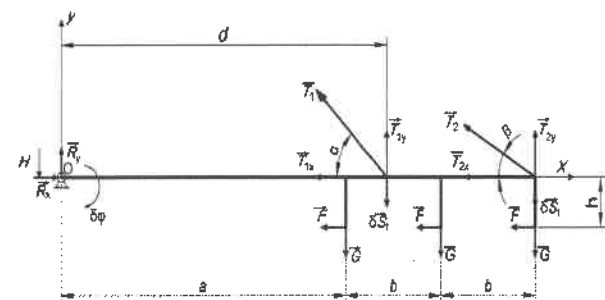


Рисунок 2 – Расчетная схема кронштейна КПСИП-3

В рамках данной работы будем использовать подход к раскрытию статической неопределенности системы сил, основанный на упрощенных соотношениях статики твердого тела. Как будет показано далее, результаты использования данного подхода и метода сил для рассматриваемой конструкции различаются существенно.

Возможным перемещением балки кронштейна является поворот на угол  $\delta\varphi$  вокруг шарнира  $O$  (см. рисунок 2). При этом точка крепления «малой» тяги смещается вертикально на  $\delta s_1 = \delta\varphi \cdot d$ , а точка крепления «большой» тяги – на  $\delta s_2 = \delta\varphi(a+2b)$ . Данные смещения определяют удлинения соответствующих тросов

$$\Delta l_1 = l_1 - l_{01} = \sqrt{(H + \delta s_1)^2 + d^2} - \sqrt{H^2 + d^2}; \quad (2)$$

$$\Delta l_2 = l_2 - l_{02} = \sqrt{(H + \delta s_2)^2 + (a+2b)^2} - \sqrt{H^2 + (a+2b)^2}.$$

Здесь  $l_{01}, l_{02}$  – длины тросов без учета возможного смещения. Так как возможные перемещения являются бесконечно малыми, то выражения для удлинений  $\Delta l$  можно разложить в ряд по степеням  $\delta s$  и оставить только линейные слагаемые

$$\Delta l_1 = \Delta l_1|_{\delta s_1=0} + \frac{d\Delta l_1}{d\delta s_1}|_{\delta s_1=0} \cdot \delta s_1 = \frac{H\delta s_1}{\sqrt{H^2 + d^2}};$$

$$\Delta l_2 = \Delta l_2|_{\delta s_2=0} + \frac{d\Delta l_2}{d\delta s_2}|_{\delta s_2=0} \cdot \delta s_2 = \frac{H\delta s_2}{\sqrt{H^2 + (a+2b)^2}}. \quad (3)$$

В соответствии с законом Гука удлинения тросов вызывают возникновение в данных тросах сил натяжения

$$T_1 = EA \frac{\Delta l_1}{l_{01}}, \quad T_2 = EA \frac{\Delta l_2}{l_{02}}.$$

Здесь  $E, A$  – модуль Юнга материала и площадь поперечного сечения тросов.

Подставив в равенства для сил натяжения соотношения (1)–(3), получим

$$T_1 = EA\delta\varphi \frac{Hd}{[H^2 + d^2]}, \quad T_2 = EA\delta\varphi \frac{H(a+2b)}{[H^2 + (a+2b)^2]}. \quad (4)$$

Для определения сил натяжения в тросах составим уравнение равновесия балки кронштейна. Сумма моментов сил относительно шарнира  $O$  равна нулю

$$T_{1y}d + T_{2y}(a+2b) - Ga - G(a+b) - G(a+2b) - 3Fh = 0.$$

Подставим в данное уравнение равновесия выражения для сил натяжения. После выполнения математических преобразований получим выражение для комбинации величин  $EA\delta\varphi$

$$EA\delta\varphi = \frac{3}{H^2} [G(a+b) + Fh] \times \left( \frac{d^2}{[H^2 + d^2]^{3/2}} + \frac{(a+2b)^2}{[H^2 + (a+2b)^2]^{3/2}} \right)^{-1}. \quad (5)$$

Зная данную комбинацию величин, определяем по формулам (4) силы натяжения в тросах. Для определения силы в шарнире  $O$  составим уравнения равновесия балки кронштейна. Сумма проекций сил на ось  $x$  (рисунок 2) равна нулю

$$R_x - T_{1x} - T_{2x} - 3F = 0.$$

Следовательно

$$R_x = T_1 \frac{d}{\sqrt{H^2 + d^2}} + T_2 \frac{a+2b}{\sqrt{H^2 + (a+2b)^2}} + 3F. \quad (6)$$

Сумма проекций сил на ось  $y$  равна нулю

$$R_y + T_{1y} + T_{2y} - 3G = 0.$$

Следовательно

$$R_y = 3G - T_1 \frac{H}{\sqrt{H^2 + d^2}} - T_2 \frac{H}{\sqrt{H^2 + (a+2b)^2}}. \quad (7)$$

Зная проекции  $R_x$  и  $R_y$ , определим модуль реакции шарнира

$$R_0 = \sqrt{R_x^2 + R_y^2}. \quad (8)$$

Таким образом, последовательное использование соотношений (5), (4), (6), (7), (8) позволяет при заданных значениях размеров кронштейна ( $H$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $h$ ) и известных нагрузках ( $F$ ,  $G$ ) определить значения сил в тросах и шарнире для произвольного значения  $d$ .

#### Пример расчета

На рисунке 3 представлены расчетные зависимости силы в «большой» тяге и реакции шарнирного крепления от расстояния  $d$ , полученные для нормативных значений нагрузок [2]  $G = 2$  кН и  $F = 0,3G = 0,6$  кН. Данные графики позволяют сделать вывод о том, что снижение силовой нагруженности кронштейна наиболее эффективно реализуется в диапазоне значений  $d$  от 1000 до 1200 мм. Учитывая требование минимизации материалоемкости конструкции, в качестве оптимального значения расстояния  $d$  можно принять  $d_0 = 1090$  мм, соответствующее математическому минимуму реакции в шарнире.

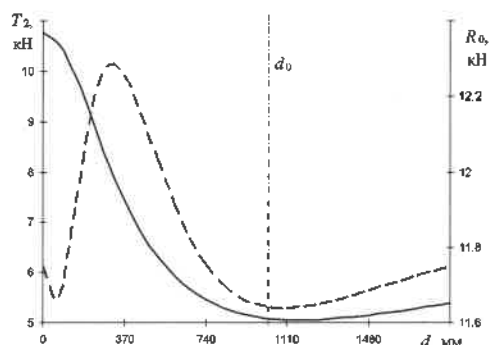


Рисунок 3 – Расчетные зависимости силы натяжения в «большой» тяге (сплошная кривая) и реакции шарнирного крепления (пунктирная) от расстояния между точкой крепления «малой» тяги к балке кронштейна и шарнирным креплением

В таблице 2 представлено сопоставление результатов использования разработанной методики с расчетными оценками, полученными при раскрытии статической неопределенности методом сил [4].

Таблица 2 – Расчетные оценки силы натяжения в «малой» тяге и максимального (по модулю) момента в балке кронштейна

$d$ , мм	$T_1$ , кН		$M_{max}$ , кН·м
	Метод сил	Разработанная методика	
850 ( $a$ )	6,67	7,04	0,88
1090 ( $d_0$ )	6,08	6,54	0,48
1350 ( $a + b$ )	5,79	6,09	0,65

Трудно прогнозируемым является тот факт, что оценки силы натяжения в «малой» тяге (а значит, и сил  $T_2$ ,  $R_0$ ), полученные на основе различных подходов практически совпадают. Расхождение данных значений не превышает 10 % от соответствующих оценок, полученных в рамках методов механики материалов. При этом разработанная упрощенная методика приводит к несколько завышенным оценкам силы  $T_1$ .

Получено 10.10.2024

**D. V. Shkoroedov, D. A. Chernous.** Option for calculation of power loading of a double-trust bracket of transmission line.

A calculation method for determining the power loading of a double-thrust bracket KPSIP-3 has been developed, based on the use of equations of rigid body statics and the assumption of non-deformability of the bracket beam. Unlike traditional methods of material mechanics, this method allows obtaining relatively simple analytical relationships for the reactions of connections and conducting a multi-parameter analysis of the power loading of the bracket during operation. The dependences of the forces in the bracket fastenings and the internal moment in the beam on the values of one of the design parameters have been established. The calculation results are compared with the data obtained using the force method to disclose static uncertainty.

Зная реакции внешних связей, можно установить распределение внутреннего изгибающего момента в балке кронштейна. Рассмотрим эпюры момента для трех характерных положений «малой» тяги (рисунок 4). Можно отметить, что при крепении тяги на расстоянии  $d = d_0$  максимальное по модулю значение изгибающего момента будет наименьшим из рассмотренных вариантов.

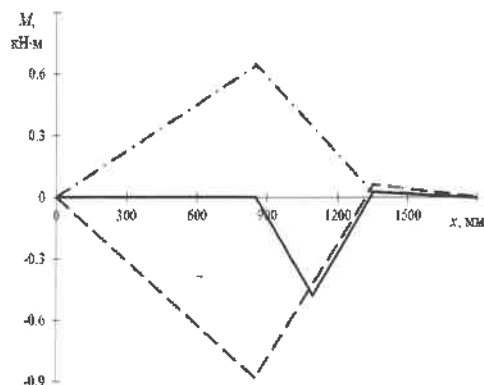


Рисунок 4 – Эпюры внутреннего изгибающего момента в балке кронштейна при  $d = d_0$  (сплошная кривая),  $d = a$  (пунктирная),  $d = a + b$  (штрихпунктирная)

#### Заключение

С использованием разработанной методики установлено оптимальное с точки зрения минимизации реакций внешних связей и внутреннего изгибающего момента значение расстояния от шарнирного крепления до точки крепления «малой» тяги к балке кронштейна. Показано, что расчетные оценки, полученные на основе разработанной методики не более чем на 10 % отличаются от результатов использования метода сил.

#### Список литературы

- 1 НГО-13-3320. Кронштейны из полимерных материалов. – М.: ЦНИИС, 2013. – 82 с.
- 2 Кочунов, Ю. А. Разработка и исследования полимерного кронштейна воздушной линии электропередачи в сетях нетяговых железнодорожных потребителей 6–10 кВ : дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / Ю. А. Кочунов. – Екатеринбург, 2016. – 235 с.
- 3 ТКП 641-2019 (33240). Линии электропередачи воздушные. Ветровые воздействия, гололедные нагрузки и ветровые воздействия при гололеде / М-во энергетики Респ. Беларусь. – Минск : Экоэнерго, 2020. – 121 с.
- 4 Старовойтов, Э. И. Механика материалов : учеб. / Э. И. Старовойтов. – Гомель : БелГУТ, 2011. – 380 с.
- 5 Алямовский, А. А. Инженерные расчеты в SolidWork Simulation / А. А. Алямовский. – М.: ДМК-Пресс, 2010. – 464 с.
- 6 Шимановский, А. О. Статика твердого тела : учеб.-метод. пособие / А. О. Шимановский. – Гомель : БелГУТ, 2023. – 87 с.
- 7 Кочунов, Ю. А. Аналитическое определение прочности стеклопластикового кронштейна проводов для линий продольного электроснабжения / Ю. А. Кочунов // Транспорт Урала. – 2014. – № 3 (43). – С. 102–108.