

РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ОТКРЫТЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ
МИНИСТЕРСТВА ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

11/10/1

Одобрено кафедрой
«Энергоснабжение
электрических железных дорог»

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ КОНТАКТНЫЕ ПОДВЕСКИ

Задание на контрольную работу
с методическими указаниями
для студентов VI курса
специальности

101800 ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ (ЭНС)



Москва – 2004

С о с т а в и т е л ь — ассистент В.В. Туркин

Р е ц е н з е н т ы: д-р техн. наук, проф. А.Т. Демченко,
канд. техн. наук, доц. Г.И. Гатальский

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ КОНТАКТНЫЕ ПОДВЕСКИ

Задание на контрольную работу

Редактор *В.К. Тихонычева*
Корректор *В.В. Игнатова*
Компьютерная верстка *О.А. Денисова*

Тип. зак.	Изд. зак. 375	Тираж 500 экз.
Подписано в печать	Гарнитура Times.	Офсет
Усл. печ. л. 1,25		Формат 60×90 ¹ / ₁₆

Издательский центр РГОТУПСа,
125993, Москва, Часовая ул., 22/2

Типография РГОТУПСа, 125993, Москва, Часовая ул., 22/2

© **Российский государственный открытый технический университет
путей сообщения Министерства путей сообщения Российской
Федерации, 2004**

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЕ

Одним из важных направлений развития контактной сети является совершенствование скоростных характеристик контактных подвесок. В качестве критериев оценки пригодности той или иной конструкции к скоростному движению наиболее часто используют эластичность контактной подвески и коэффициент ее неравномерности в пролете.

Целью работы является изучение методики расчета эластичности пространственно-ромбовидных автокомпенсированных контактных подвесок (ПРАКС) и вертикальных цепных подвесок с учетом конечного числа струн.

В контрольной работе предлагается определить закон изменения эластичности участка контактной подвески, тип которой выбирается в соответствии с заданием. Варианты задания определяются по трем последним цифрам учебного шифра студента.

1. ЗАДАНИЕ НА КОНТРОЛЬНУЮ РАБОТУ

1.1. Постановка задачи

Для заданного участка контактной подвески требуется:

1. Рассчитать эластичность контактной подвески в пределах заданного участка.
2. По рассчитанным значениям построить график изменения эластичности заданной контактной подвески. Определить коэффициент неравномерности эластичности.
3. Сделать вывод по работе с предложением мер по выравниванию эластичности на заданном участке. Все предложения должны быть обоснованы соответствующими расчетами.

Тип подвески, ее силовые и геометрические параметры определяются в соответствии с цифрами учебного шифра студента.

1.2. Исходные данные

Исходные данные приведены на рис.1–5 и в табл. 1–3.

Тип контактной подвески

Единицы учебного шифра студента									
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A		Б		В		Г		Д	

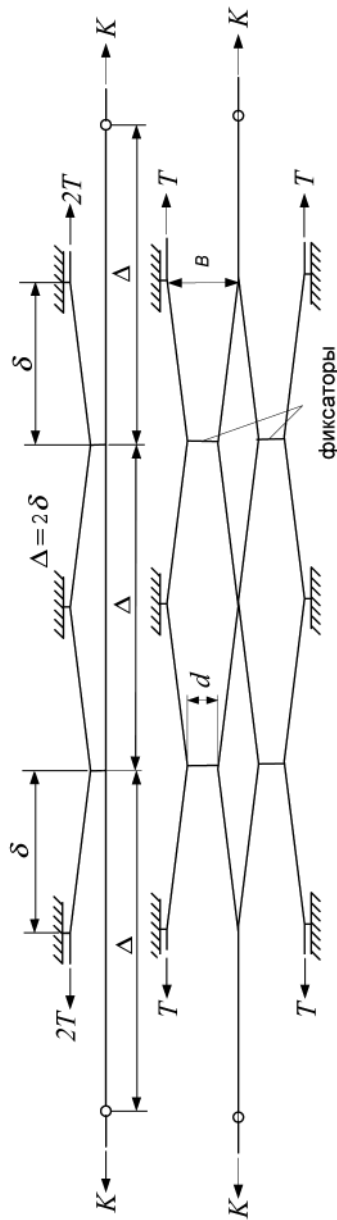
Вариант А. ПРАКС с одним ромбом в пролете¹

Рис. 1

¹ Кругами отмечены точки крепления контактного провода на концах условного анкерного участка.

Вариант Б. Асимметричная ПРАКС с одним ромбом в пролете

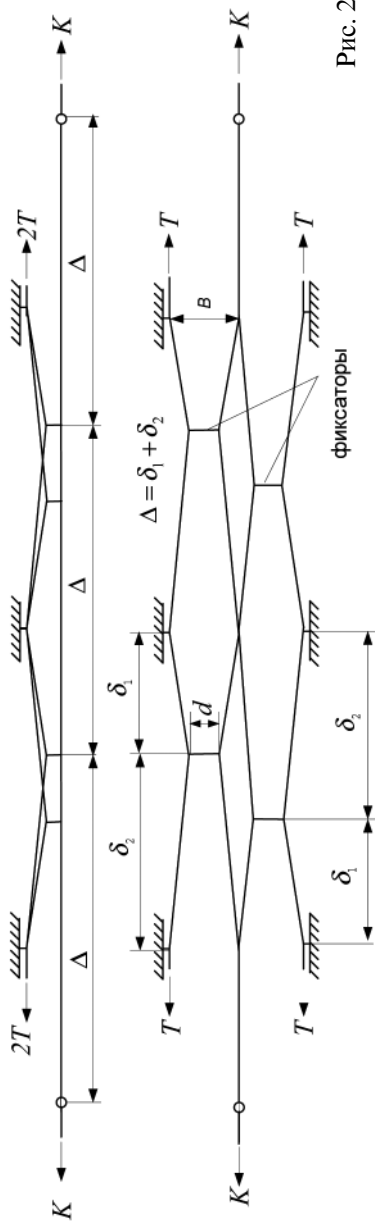


Рис. 2

Вариант В. ПРАКС с двумя ромбами в пролете

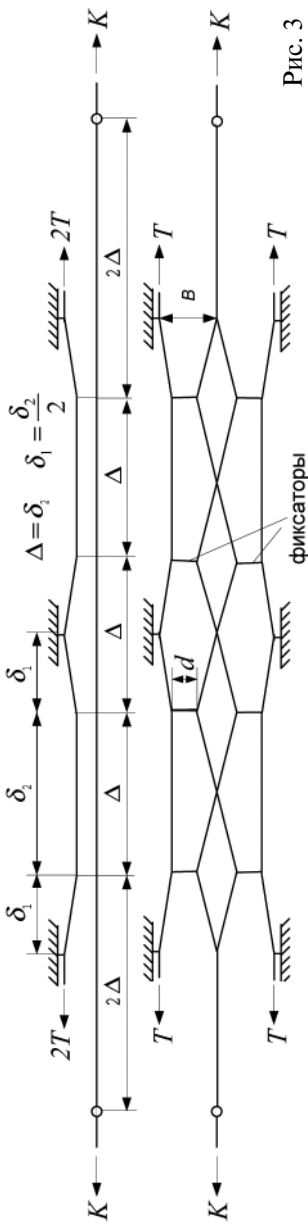


Рис. 3

6

Вариант Г. Вертикальная цепная подвеска со смещенными опорными струнами

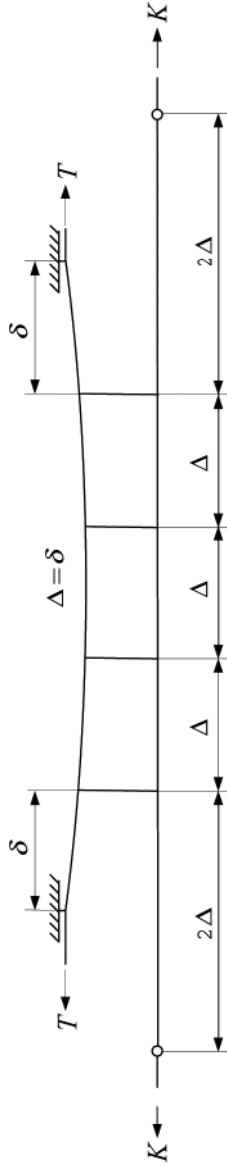


Рис. 4

Вариант Д. Вертикальная цепная подвеска со смещенными опорными струнами

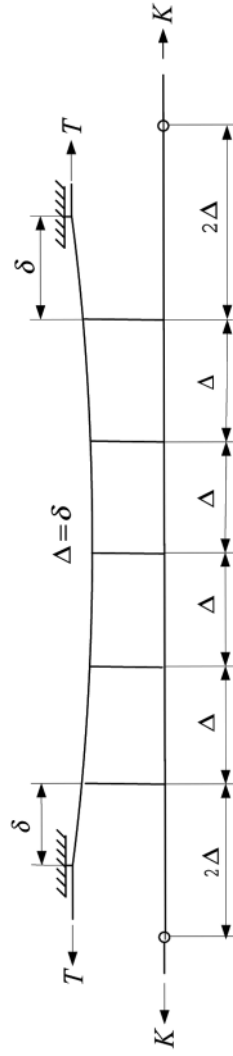


Рис. 5

Таблица 2

Силловые параметры

	Десятки учебного шифра									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Натяжение несущего троса T , кН	12,3	14,8	7,6	17,6	9,8	12,1	10,7	15,4	11,7	16,5
Натяжение контактного провода K , кН	17,6	19,6	18,4	17,3	18,1	16,9	17,3	16,1	14,4	18,6

Таблица 3

Геометрические параметры²

Сотни учебного шифра	$\frac{\delta}{d}$	$\frac{\delta_1/\delta_2}{d}$	$\frac{\delta_2}{d}$	δ	δ
0	$\frac{5,4}{0,420}$	$\frac{4,8/7,2}{0,211}$	$\frac{4,0}{0,348}$	12	4,8
1	$\frac{7,4}{0,245}$	$\frac{7,2/6,4}{0,261}$	$\frac{9,6}{0,380}$	8,4	5,3
2	$\frac{6,6}{0,600}$	$\frac{6,4/8,5}{0,312}$	$\frac{8,8}{0,467}$	7,6	4,9
3	$\frac{8,6}{0,325}$	$\frac{8,0/5,3}{0,420}$	$\frac{7,4}{0,530}$	10	11
4	$\frac{6,2}{0,200}$	$\frac{10,4/6,8}{0,278}$	$\frac{8,2}{0,459}$	7,2	7,7
5	$\frac{8,2}{0,465}$	$\frac{5,6/10,2}{0,390}$	$\frac{6,2}{0,290}$	6,8	9,1
6	$\frac{7}{0,555}$	$\frac{9,6/11,4}{0,225}$	$\frac{9,8}{0,354}$	10	4,5
7	$\frac{9,0}{0,375}$	$\frac{6,4/12,8}{0,520}$	$\frac{7,8}{0,652}$	9,5	6,8
8	$\frac{7,8}{0,290}$	$\frac{8,8/6,3}{0,456}$	$\frac{6,4}{0,534}$	12	2,9
9	$\frac{5,8}{0,510}$	$\frac{11,2/8,9}{0,220}$	$\frac{11,6}{0,487}$	8,4	12
	А	Б	В		

² Все параметры в таблице приведены в метрах.

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

2.1. Рекомендации по выполнению контрольной работы

Для выполнения контрольной работы необходимо иметь четкое представление о конструкции и принципах работы перспективных контактных подвесок, знать основные критерии оценки скоростных свойств контактных подвесок: эластичности и коэффициента неравномерности эластичности в пролете. Кроме того, потребуется знание основ теоретической механики.

Конструкция и принципы работы автокомпенсированных контактных подвесок подробно рассматриваются в [1]. Базовые сведения об эластичности контактных подвесок, а также описание простейших методик расчета эластичности приводятся в [2]. В качестве справочного пособия по курсу теоретической механики рекомендуется использовать [3]. Все расчеты следует проводить на ЭВМ с использованием пакетов компьютерной математики, например, MathCAD или MatLab.

Эластичность — это характеристика контактной подвески, определяемая отношением перемещения контактного провода под действием вертикальной сосредоточенной силы, направленной снизу вверх, к величине этой силы, мм/Н:

$$\eta(x) = \frac{y(x)}{P_x},$$

где $y(x)$ — перемещение контактного провода в точке x , мм;

P_x — абсолютная величина силы, приложенной к контактному проводу в точке x , Н.

Очевидно, что величина отжатия контактного провода, а, следовательно, и траектория токоприемника, зависят от характера изменения эластичности в анкерном участке контактной подвески. Установлено, оптимальным является такой режим токосъема, в котором траектория движущегося токоприемника остается прямой, поэтому эластичность считается важнейшей скоростной характеристикой контактных подвесок. Неравномерность

эластичности вызывает раскачивание полоза токоприемника и отрывы токоприемника от контактной подвески, приводя к нарушениям работы электрооборудования электроподвижного состава (ЭПС), резкому возрастанию уровня электромагнитных помех в аппаратуре СЦБ и линиях связи, повышенному износу контактного провода и токосъемных элементов на токоприемниках. По этой причине при разработке проектов контактной сети для скоростных участков большое внимание уделяется исследованию эластичности и поиску технических решений, направленных на снижение ее неравномерности, которая, как правило, оценивается коэффициентом неравномерности:

$$K_{\eta} = \frac{\eta_{\max}}{\eta_{\min}},$$

где η_{\max} — максимальное в пролете значение эластичности;
 η_{\min} — минимальное в пролете значение эластичности.

Коэффициент неравномерности эластичности идеальной контактной подвески равен единице. Правилами устройства и технической эксплуатации контактной сети (ЦЭ-868) для скоростной контактной подвески КС-200 установлен наибольший допустимый коэффициент неравномерности 1,2, а для контактной подвески КС-160 — 1,35. Эластичность принято считать характеристикой пролета, однако правильнее рассматривать ее как характеристику всего анкерного участка, так как ее величина определяется не только параметрами рассматриваемого пролета (силовыми, геометрическими), но и параметрами смежных пролетов. Так, в задании на контрольную работу предлагается определить закон изменения эластичности в пределах короткого «анкерного участка», состоящего из одного-двух пролетов. Это позволяет существенно сократить трудоемкость решения по сравнению с расчетом протяженного анкерного участка. С другой стороны, расчет эластичности такого короткого анкерного участка отличается от расчета реальной подвески лишь меньшим числом составляемых уравнений.

Методика расчета, используемая в данной работе, основана на двух предположениях: все провода подвески считаются абсолютно гибкими, а составляющие натяжений, направленные вдоль оси

пути, — постоянными, т.е. не зависящими от силы нажатия токоприемника. Кривая провисания контактного провода рассматривается как результат наложения прогибов от веса подвески, от силы нажатия токоприемника и от реакций упругих элементов (принцип сложения прогибов). При малых прогибах, распределение нагрузки от веса контактной подвески остается постоянным и не влияет на перемещение контактного провода под действием нажатия токоприемника. Поэтому можно считать, что в отсутствии внешних сил провода подвески располагаются беспровесно на уровнях $y = 0$, $z = 0$ (на рис. 6), при этом в качестве расчетных необходимо использовать составляющие натяжений контактного провода и несущих тросов, *параллельные оси пути*.

На рис. 1–3 изображены проекции пространственно-ромбовидных автокомпенсированных контактных подвесок: вид сбоку и вид сверху. Первая из них используется для построения системы уравнений для определения эластичности контактной подвески. Она является основной. Вторая необходима для расчета горизонтальных составляющих натяжений в фиксаторах. В струнах вертикальных цепных подвесок горизонтальные составляющие натяжения малы и при расчете ими пренебрегают, поэтому на рис. 4 и 5 показаны только основные проекции.

Расчетную схему составляют в следующем порядке.

1. Тонкими штриховыми линиями изображают исходное положение проводов подвески. Провесы несущего троса и контактного провода не показывают (см. рис. 6). Далее наносят оси y и z и установленные натяжения несущего троса T и контактного провода K . При расчете ПРАКС, для того чтобы учесть наличие двух несущих тросов используют удвоенное значение натяжения $2T$. Под натяжением контактного провода K понимают горизонтальную составляющую натяжения обоих контактных проводов, поэтому увеличивать значение K вдвое не следует. Между несущим тросом и контактным проводом вместо фиксаторов и струн изображают упругие элементы, которым приписывают жесткость c .

2. Показывают внешнюю силу P в произвольном месте межструнового промежутка. Непрерывными линиями изображают новое положение проводов подвески. При этом контактный провод в рассматриваемом межструновом промежутке делится на две части: правую и левую. Длина правой части — $\Delta_{лр}$, а левой — $\Delta_{лл}$.

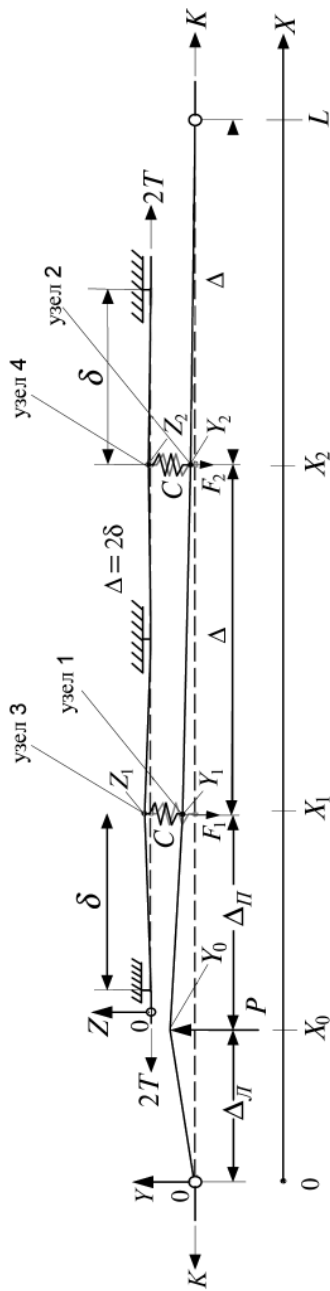


Рис. 6. Основная расчетная схема ПРАКС с одним ромбом в пролете

3. Рядом с узлами подвески указывают их ординаты: для контактного провода по оси y , для несущего троса — по оси z .

4. Если выполняется расчет ПРАКС, то при составлении схемы необходимо учесть сжатие упругих элементов c . Струны вертикальных цепных подвесок считают несжимаемыми, однако при выводе уравнений им также ставят в соответствие жесткость c . На конечном этапе расчета, подбирают достаточно большое значение параметра c так, чтобы дальнейшее его увеличение c не приводило к изменению эластичности в любой точке участка более чем на 1%.

В соответствии с принципом сложения прогибов составляют уравнение для определения отжатия y_0 в точке приложения силы P . Для рассматриваемого случая уравнение записывается следующим образом:

$$y_0 = Pf(x_0, x_0) - F_1 f(x_0, x_1) - F_2 f(x_0, x_2), \quad (1)$$

где F_1, F_2 — реакции со стороны упругих элементов в узлах 1 и 2; $f(x, x_i)$ — функция Грина, которая в нашем случае задает положение провода в произвольной точке x , к которому в некоторой точке x_i приложена единичная сосредоточенная сила.

Функция Грина записывается следующим образом:

$$f(x, x_i) = \begin{cases} \frac{x(L - x_i)}{LK}, & \text{если } x \leq x_i; \\ \frac{(L - x)x_i}{LK}, & \text{если } x > x_i. \end{cases}$$

Сила P является заданной ($P = 1 H$), реакции F_1, F_2 находят по закону Гука через жесткость c и разность перемещений y и z в каждом узле.

Перенося все члены с неизвестными в правую часть, уравнение (1) приводят к виду:

$$y_0 + c(y_1 - z_1)f(x_0, x_1) + c(y_2 - z_2)f(x_0, x_2) = Pf(x_0, x_0). \quad (2)$$

Слагаемые в левой части уравнения (2) группируют по неизвестным y_0, y_1, y_2, z_1, z_2 :

$$y_0 + cf(x_0, x_1)y_1 + cf(x_0, x_2)y_2 - cf(x_0, x_1)z_1 - cf(x_0, x_2)z_2 = Pf(x_0, x_0). \quad (3)$$

Далее составляют уравнения статического равновесия вертикальных проекций всех сил, действующих на узлы подвески (по одному уравнению на каждый узел). Рекомендуется записывать уравнения в следующем порядке: сначала — уравнение, полученное в соответствии с принципом сложения прогибов, затем — уравнения равновесия узлов контактного провода и, наконец, уравнения равновесия узлов несущего троса. Для первого узла (см. рис. 6) имеем:

$$K \frac{y_0 - y_1}{\Delta_{II}} - c(y_1 - z_1) - K \frac{y_1 - y_2}{\Delta} = 0. \quad (4)$$

В (4) слагаемые со знаком «плюс» соответствуют проекциям сил на ось y , направленным вверх, слагаемые со знаком «минус» соответствуют проекциям сил на ось y , направленным вниз. После преобразования получаем:

$$\frac{K}{\Delta_{II}} y_0 - \left(c + \frac{K}{\Delta_{II}} + \frac{K}{\Delta} \right) y_1 + \frac{K}{\Delta} y_2 + cz_1 = 0. \quad (5)$$

Аналогичным образом записывают уравнения равновесия для остальных узлов контактной подвески. В рассматриваемом случае получают систему из пяти линейных уравнений. Первое уравнение составлено в соответствии с принципом сложения прогибов, второе, третье, четвертое и пятое уравнения описывают состояние равновесия соответственно узлов 1, 2, 3 и 4 (см. рис. 6).

Решив полученную систему, получают значения отжатий всех узлов подвески от первоначального положения (y_0, y_1, y_2, z_1, z_2). При силе $P = 1 \text{ Н}$, величина y_0 численно равна эластичности контактной подвески η в точке x .

При расчете ПРАКС для решения системы уравнений необходимо определить величину эквивалентной жесткости фиксатора. Формулы для расчета эквивалентной жесткости в зависимости от типа ПРАКС приведены в табл. 4. Горизонтальный габарит подвески B следует принять равным 1 м.

Эквивалентная жесткость фиксатора

Тип ПРАКС	Формула для расчета жесткости фиксатора
ПРАКС с одним ромбом	$c = \frac{2K}{l} \cdot \frac{\left(\frac{B}{d}\right)^{-1}}{1 + \left(\frac{K}{2T}\right)}$
Асимметричная ПРАКС с одним ромбом в пролете	$c = \frac{K}{2} \left(\frac{1}{\delta_1} + \frac{1}{\delta_2} \right) \frac{\left(\frac{B}{d} - 1\right)}{\left(1 + \frac{K}{2T}\right)}$
ПРАКС с двумя ромбами в пролете	$c = \frac{4K}{l} \cdot \frac{\left(\frac{B}{d}\right)^{-1}}{1 + \left(\frac{K}{T}\right)}$

При расчете эластичности асимметричной ПРАКС выбирают одну из половин контактной подвески (рис. 7, а). Далее, рассматривают симметричную контактную подвеску, состоящую из двух половин выбранного вида (рис. 7, б), и получают закон изменения эластичности. Затем выбирают вторую половину подвески и рассчитывают значения эластичности, считая подвеску симметричной. Окончательно, используя (6), получают искомый закон изменения эластичности асимметричной пространственно-ромбовидной контактной подвески

$$\eta(x) = 2 \frac{\eta_1 \eta_2}{\eta_1 + \eta_2}. \quad (6)$$

2.2. Последовательность решения задачи

1. По табл. 1–3 в соответствии с тремя последними цифрами учебного шифра необходимо выбрать тип, геометрические и силовые параметры контактной подвески.

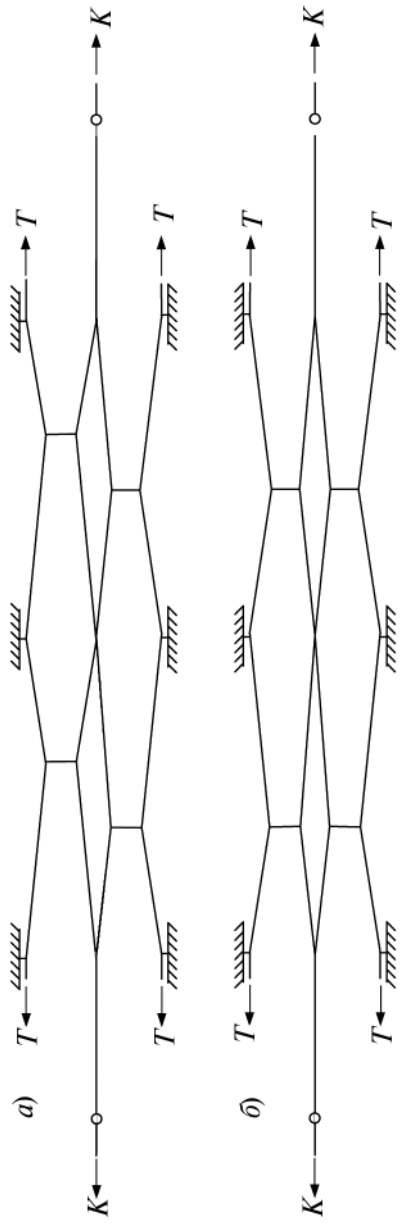


Рис. 7. К расчету асимметричной ПРАКС

2. Если выполняется расчет ПРАКС, рассчитать эквивалентную жесткость фиксатора.

3. Задав направление перемещения токоприемника с нажатием 1 Н, составить расчетную схему для случая нахождения токоприемника в первом межструновом промежутке (между точкой крепления контактного провода и первой струной или фиксатором).

4. Составить систему уравнений для определения перемещений узлов контактной подвески, вызванных нажатием токоприемника.

5. Решив полученную систему уравнений любым из методов линейной алгебры, например, методом Крамера, Гаусса или обратной матрицы, определить значение эластичности в каждой точке выбранного межструнового промежутка.

6. Изменяя координату токоприемника в пределах выбранного межструнового промежутка, получить закон изменения эластичности $\eta(x)$ во всем межструновом промежутке.

7. Повторив шаги 3–6, для остальных межструновых промежутков, получить закон изменения эластичности $\eta(x)$ на всем участке.

8. Построить кривую зависимости эластичности η рассмотренной контактной подвески от координаты x .

9. По наибольшему и наименьшему значениям эластичности определить величину коэффициента неравномерности. В качестве наименьшего значения эластичности следует принять эластичность под первой струной или фиксатором.

10. В соответствии с п. 3 задания сделать вывод по работе.

Список литературы

1. Демченко А.Т. Пространственные контактные подвески. — М.: Транспорт, 1991.

2. Михеев В.П. Контактные сети и линии электропередачи. — М.: Маршрут, 2003.

3. Тарг С.М. Краткий курс теоретической механики. — М.: Высшая школа, 1995.