

Министерство транспорта Российской Федерации  
Федеральное агентство железнодорожного транспорта  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Дальневосточный государственный  
университет путей сообщения»

Кафедра «Локомотивы»

И.И. Доронина, В.В. Трофимович

## **РАСЧЕТ РАМЫ ТЕЛЕЖКИ ЭЛЕКТРОВОЗА НА ПРОЧНОСТЬ**

Методическое пособие  
для выполнения курсового проекта

Хабаровск  
Издательство ДВГУПС  
2017

УДК 629.423.1 – 027.2 (075.8)  
ББК О 232.1 – 046.52.я73  
Д 693

Рецензент:

Доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог»  
Дальневосточного государственного университета путей сообщения,  
кандидат технических наук  
*В.Н. Панкин*

**Доронина, И.И.**

**Д 693** Расчет рамы тележки электровоза на прочность : метод. пособие для выполнения курсового проекта / И.И. Доронина В.В. Трофимович. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2017. – 64 с. : ил.

Методическое пособие соответствует рабочей программе дисциплины «Механическая часть электроподвижного состава».

Рассмотрена методика, расчетные формулы и последовательность действий для расчета основных технических данных электровоза, нагрузок, действующих на раму тележки с оценкой ее статической и усталостной прочности.

Предназначено для студентов 3–4-го курсов всех форм обучения специальности 25.05.03 «Подвижной состав железных дорог» специализации «Электрический транспорт железных дорог», выполняющих курсовой проект.

УДК 629.423.1 – 027.2 (075.8)  
ББК О 232.1 – 046.52.я73

© ДВГУПС, 2017

## ВВЕДЕНИЕ

Изучению устройства и методов проектирования элементов экипажной части электровозов посвящена дисциплина «Механическая часть электроподвижного состава», в программе которой предусмотрено выполнение курсового проекта для практического решения некоторых задач проектирования экипажной части электровоза и расчета ее на прочность.

В курсовом проекте необходимо определить основные технические данные электровоза, осуществить проектирование и расчет на прочность элементов экипажной части электровоза: системы рессорного подвешивания, тележки электровоза и т. д. Все расчеты должны выполняться в строгом соответствии с приведенной методикой с обязательным использованием рекомендуемой литературы.

В качестве исходных данных для выполнения курсового проекта используются следующие параметры:

- 1) род службы (грузовой или пассажирский);
- 2) ток (постоянный или переменный);
- 3) осевая формула;
- 4) нагрузка от колесной пары на рельсы  $2P$ , кН;
- 5) тип тягового электродвигателя;
- 6) подвешивание тягового двигателя (опорно-осевое или опорно-рамное);
- 7) конструкционная скорость электровоза  $V_k$ , км/ч.

При выполнении курсового проекта с использованием параметров указанного в задании серийного электровозного тягового двигателя студент должен научиться определять основные технические данные электровоза, разрабатывать эскизный проект механической части электровоза, составлять упрощенную весовую ведомость, определять нагрузки рамы тележки и производить оценку ее статической и усталостной прочности. В курсовом проекте широко используются технические характеристики серийных электровозов и элементов их механической части.

Проект рекомендуется выполнить с применением электронных таблиц программы Microsoft Excel и оформить с применением редактора Microsoft Word в виде пояснительной записки, в которой приводятся расчетные формулы с необходимыми пояснениями, расчетные схемы, графики, эпюры моментов, результаты расчетов и выводы.

При оформлении пояснительной записки и выполнении графической части проекта необходимо строго соблюдать требования ГОСТ 2.105-95.

Задание на выполнение курсового проекта выдается преподавателем с указанием срока выполнения.

При защите курсового проекта студент должен знать методику выполнения расчетов, основные определения и понятия, основные нормативы, используемые в расчетах, а также дать ответы на контрольные вопросы.

В результате выполнения курсового проекта студент должен

**знать:**

- методы расчета геометрических и прочностных характеристик элементов рамы тележки электровоза;

**уметь:**

- выполнять расчеты геометрических и прочностных характеристик элементов рамы тележки электровоза;

**владеть:**

- навыками проектирования и прочностного расчета элементов рамы тележки электровоза.

# 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ДАННЫХ ЭЛЕКТРОВОЗА

В курсовом проекте необходимо определить следующие основные технические данные:

- сцепную массу электровоза;
- передаточное число тяговой зубчатой передачи;
- мощность, скорость и силу тяги электровоза в часовом и номинальном режимах;
- предварительные значения длины электровоза по осям автосцепок и жесткой базы электровоза;
- выполнить проверки рассчитанных параметров.

На первом этапе расчета с использованием табл. 1 прил. 1 выбираются технические данные тягового двигателя электровоза, которые необходимо представить в форме табл. 1.1.

Таблица 1.1

**Технические данные тягового двигателя \_\_\_\_\_  
(тип тягового двигателя)**

Параметры тягового двигателя	Численные значения
Мощность двигателя, кВт: – в часовом режиме $P_{час}$ – в номинальном режиме $P_{ном}$	
Частота вращения якоря, об/мин: – в часовом режиме $n_{час}$ – в номинальном режиме $n_{ном}$ – максимальная $n_{max}$	
Масса (вес) двигателя $M_{мэд}$ , т	
Централь двигателя $Ц$ , мм	
Поперечная длина остова $\ell_{ос}$ , мм	
Расстояние между точками подвешивания $\ell_{под}$ , мм	
Тип передачи	

Сцепная масса электровоза  $M_{сц}$  есть масса вложенных в конструкцию материалов с 2/3 запаса песка и рассчитывается по формуле

$$M_{сц} = \frac{2\Pi n_{кп}}{9,8}, \quad (1.1)$$

где  $n_{кп}$  – число колесных пар, определяемое по формуле ходовых частей, указанной в задании на курсовой проект.

Передаточное число зубчатой тяговой передачи должно обеспечивать движение электровоза с заданной конструкционной скоростью. Предварительное значение передаточного числа тяговой зубчатой передачи  $\mu$  рассчитывается по формуле

$$\mu = 0,189 D_k \frac{n_{max}}{V_k}, \quad (1.2)$$

где  $D_k$  – диаметр колеса по кругу катания, рекомендуется принять значение 1250 мм.

На следующем этапе рассчитывается вращающий момент на валу тягового двигателя в номинальном режиме (за номинальный режим принимается продолжительный режим работы), кН·м

$$M_{ном} = 9,545 \frac{P_{ном}}{n_{ном}}. \quad (1.3)$$

Модуль зубчатого зацепления зависит от типа передачи (прямозубая, косозубая, односторонняя, двухсторонняя) и величины вращающего момента на валу тягового двигателя [3].

По рассчитанному значению  $M_{ном}$  устанавливаются граничные значения модуля зубчатого зацепления:

- для прямозубых (односторонних) передач:

$$m_{max} = 1,378 M_{ном} + 8,01, \quad (1.4)$$

$$m_{min} = 1,378 M_{ном} + 6,41; \quad (1.5)$$

- для косозубых (двухсторонних) передач

$$m_{max} = 1,378 M_{ном} / 2 + 6,41, \quad (1.6)$$

$$m_{min} = 1,378 M_{ном} / 2 + 5,11. \quad (1.7)$$

Расчетное значение модуля зубчатого зацепления  $m$  назначается в соответствии с условием

$$m_{min} \leq m \leq m_{max}, \quad (1.8)$$

а затем принимается равным **стандартному значению по СТ СЭВ 310-76** (табл. 1.2), которое используется в дальнейших расчетах.

## Модули зубчатого зацепления по СТ СЭВ 310-76

Модуль $m$ , мм	1 ряд	8	10	12	16	20	25
	2 ряд	9	11	14	18	22	28

*Примечание:*

1. При выборе стандартных значений модуля предпочтение следует отдавать первому ряду.

2. В технически обоснованных случаях могут использоваться нестандартные значения модулей.

Диаметры делительных окружностей зубчатой шестерни и зубчатого колеса тяговой передачи рассчитываются по формулам:

$$D_{a2} = 2 \frac{I\zeta}{1 + \mu}, \quad (1.9)$$

$$D_{a1} = 2 \left( I\zeta - \frac{D_{a2}}{2} \right). \quad (1.10)$$

Значение диаметра  $D_{a1}$  необходимо проверить на выполнение **требований габарита подвижного состава** [2]

$$D_{a1} \leq D_{\kappa} - 2(b + \Delta), \quad (1.11)$$

где  $b$  – клиренс зубчатой передачи, т. е. расстояние от уровня головки рельса до низа кожуха зубчатой передачи,  $b = 120$  мм;  $\Delta$  – расстояние от низа кожуха зубчатой передачи до делительной окружности зубчатого колеса,  $\Delta = 20 \div 25$  мм. Если неравенство (1.11) не выполняется, то необходимо уменьшить значение  $\mu$  и повторить расчет, начиная с формулы (1.9).

На следующем этапе рассчитываются числа зубьев зубчатого колеса и шестерни по формулам:

$$Z_1 = \frac{D_{a1}}{m}, \quad (1.12)$$

$$Z_2 = \frac{D_{a2}}{m}. \quad (1.13)$$

Уточненное значение передаточного числа тяговой передачи определяется как

$$\mu = \frac{Z_1}{Z_2}. \quad (1.14)$$

**Уточненное значение передаточного числа должно обеспечить выполнение условия**

$$V_{\kappa} \leq 0,189 D_{\kappa} \frac{n_{max}}{\mu}. \quad (1.15)$$

Если условие (1.15) не выполняется, то тяговый привод не обеспечивает движение электровоза с заданной конструкционной скоростью, таким образом, необходимо выполнить корректировку числа зубьев  $Z_1$ ,  $Z_2$  и повторить расчет, начиная с выражения (1.14).

Эффективные мощности электровоза в часовом и номинальном режимах рассчитываются по формулам:

$$P_{\text{э.час}} = n_{\text{д}} P_{\text{час}}; \quad (1.16)$$

$$P_{\text{э.ном}} = n_{\text{д}} P_{\text{ном}}, \quad (1.17)$$

где  $n_{\text{д}}$  – число тяговых двигателей электровоза.

Скорости движения электровоза в часовом и номинальном режимах определяются по формулам:

$$V_{\text{час}} = 0,189 D_{\kappa} \frac{n_{\text{час}}}{\mu}; \quad (1.18)$$

$$V_{\text{ном}} = 0,189 D_{\kappa} \frac{n_{\text{ном}}}{\mu}. \quad (1.19)$$

Для определения силы тяги электровоза в часовом и номинальном режимах необходимо рассчитать подводимую к тяговой передаче мощность в этих режимах:

$$P_{\text{п.час}} = \frac{P_{\text{час}}}{P_{\text{ном}}} \cdot 100 \%; \quad (1.20)$$

$$P_{\text{п.ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{P_{\text{ном}}} \cdot 100 \%. \quad (1.21)$$

Кпд зубчатой передачи определяется в функции подводимой мощности [3]. Используя рассчитанные по формулам (1.20) и (1.21) значения, определяем кпд зубчатой тяговой передачи в часовом и номинальном режимах. Так как подводимая мощность для номинального режима всегда равна 100 %, то значение кпд тяговой передачи  $\eta_{\text{зн.ном}}$  можно определить по табл. 1.3.



Таблица 1.3

**Коэффициент полезного действия зубчатой передачи  
в зависимости от подводимой мощности**

$P, \%$	22,5	40	60	80	100	120	140	160	180	200
$\eta_{зн}$	0,915	0,958	0,974	0,978	0,978	0,974	0,970	0,968	0,966	0,965

Кпд тяговой передачи для часового режима рассчитывается по формуле

$$\eta_{зн.час} = 0,825 + 5,38 \cdot 10^{-3} \cdot p_{н.час} - 6,55 \cdot 10^{-5} \cdot p_{н.час}^2 + 3,29 \cdot 10^{-7} \cdot p_{н.час}^3 - 5,93 \cdot 10^{-10} \cdot p_{н.час}^4 \quad (1.22)$$

После этого необходимо определить вращающий момент на валу тягового двигателя в часовом режиме, кН·м,

$$M_{час} = 9,545 \frac{P_{час}}{n_{час}}, \quad (1.23)$$

а затем – силу тяги электровоза в часовом и номинальном режимах, кН:

$$F_{к.час} = \frac{2 M_{час} \mu n_{кп}}{D_k} \eta_{зн.час}, \quad (1.24)$$

$$F_{к.ном} = \frac{2 M_{ном} \mu n_{кп}}{D_k} \eta_{зн.ном}. \quad (1.25)$$

Сила тяги создается на ободах колес колесных пар (касательная сила тяги) является следствием передачи вращающего момента двигателями через тяговую передачу к осям движущих колесных пар и по движению электровоза.

**Сцепную массу электровоза**, рассчитанную по формуле (1.1), **необходимо проверить на выполнение соответствующего роду службы электровоза условия:**

- сцепная масса грузового локомотива является суммарной нагрузкой на движущиеся колесные пары и характеризует его способность развивать необходимую силу тяги без боксования. Значение сцепной массы должно обеспечивать движение по расчетному подъему с установившейся скоростью без боксования, для чего необходимо выполнение условия:

$$M_{сц}^2 \geq \frac{3,6 P_{э.ном}}{9,8 \psi_k \eta_{в} V_{ном}}, \quad (1.26)$$

где  $\eta_{\epsilon}$  – коэффициент использования сцепного веса, который рекомендуется принимать в пределах от 0,85 до 0,92 [1];  $\psi_{\kappa}$  – коэффициент сцепления колеса с рельсом, который определяется по формулам [2]:

– для электровозов постоянного тока

$$\psi_{\kappa} = 0,28 + \frac{3}{50 + 20 V_{ном}} - 0,0007 V_{ном}; \quad (1.27)$$

– для электровозов переменного тока со ступенчатым регулированием

$$\psi_{\kappa} = 0,28 + \frac{4}{50 + 6 V_{ном}} - 0,0006 V_{ном}; \quad (1.28)$$

– для электровозов переменного тока с плавным регулированием

$$\psi_{\kappa} = 0,294 + \frac{4,2}{50 + 6 V_{ном}} - 0,00063 V_{ном}; \quad (1.29)$$

• сцепная масса пассажирского электровоза должна обеспечивать заданное пусковое ускорение и удовлетворять следующему условию:

$$M_{сц}^n \geq \frac{M_n (\omega_o + \omega_{mp} + i_o + \omega_y)}{9,8 \cdot 10^3 \psi_{\kappa} \eta_{\epsilon}}; \quad (1.30)$$

где  $M_n$  – масса пассажирского поезда, рекомендуется в пределах от 950 до 1200 т [1];  $\omega_o$  – основное удельное сопротивление движению поезда, Н/т;  $\omega_{mp}$  – удельное сопротивление при трогании с места, Н/т;  $i_o$  – дополнительное сопротивление от уклона, Н/т;  $\omega_y$  – удельное сопротивление от ускоряющего усилия, Н/т. Рекомендуется принимать величину полного удельного сопротивления движению в момент трогания ( $\omega_o + \omega_{mp} + i_o$ ), равную 80 Н/т [1]. Величина  $\omega_y$  определяется по формуле

$$\omega_y = a_n / \lambda, \quad (1.31)$$

где  $a_n$  – пусковое ускорение поезда, рекомендуется в пределах от 1200 до 1800 км/ч<sup>2</sup>;  $\lambda$  – удельное пусковое ускорение, согласно [1] принимается 12,2 км·т/ч<sup>2</sup>Н;

Если соответствующее роду службы электровоза условие не выполняется, то необходимо выполнить в допустимых пределах корректировку входящих в него параметров, или, откорректировав по возможности величину 2П, повторить расчет с формулы (1.1).

На следующем этапе расчета определяется минимальная длина электровоза по осям автосцепок из условия прочности путевых сооружений

$$L_{л.мин} = \frac{9,8 M_{сц}}{[q_n]}, \quad (1.32)$$

где  $[q_n]$  – допускаемая нагрузка на единицу длины пути, принимаемая в соответствии с [1] равной 88,5 кН/м.

На начальной стадии значение длины электровоза по осям автосцепок  $L_{л}$  принимается равным одноименному параметру серийного электровоза с учетом заданных формулы ходовых частей, рода службы (табл. 2 и 3 прил. 1). При этом выбранное значение  $L_{л}$  должно быть больше минимальной длины локомотива  $L_{л.мин}$ , которая ограничена прочностью путевых сооружений и рассчитана по формуле (1.32).

Жесткая база локомотива есть расстояние между шкворнями или геометрическими центрами крайних тележек. Предварительное значение жесткой базы электровоза рассчитывается исходя из выбранного значения  $L_{л}$  по формуле

$$L_б = \frac{e L_{л}}{n_c}, \quad (1.33)$$

где  $n_c$  – число секций электровоза, определяемое по заданной формуле ходовых частей;  $e$  – коэффициент, принимается равным 0,5 ÷ 0,54 при  $L_{л} \leq 20$  м или 0,55 ÷ 0,6 при  $L_{л} > 20$  м.

### **Оформление шага по разделу 1**

1. Представить таблицу с техническими данными заданного тягового двигателя (табл. 1.1).

2. Определить сцепную массу электровоза по формуле (1.1). Точность расчетов – до целых.

3. Определить предварительное значение передаточного числа тяговой зубчатой передачи по формуле (1.2). Точность расчетов до трех знаков после запятой.

4. Определить вращающий момент на валу тягового двигателя в номинальном режиме по формуле (1.3). Результат округляется до двух знаков после запятой.

5. Определить граничные значения модуля зубчатого зацепления по формулам (1.4), (1.5) или (1.6), (1.7). Рекомендуется для пассажирского электровоза выбирать одностороннюю передачу, для грузового – двухстороннюю. Принять модуль, используя условие (1.8) и табл. 1.2.

6. Определить диаметры делительных окружностей зубчатой шестерни и зубчатого колеса тяговой передачи по формулам (1.9) и (1.10) с точностью до трех знаков после запятой.

7. Выполнить проверку условия (1.11).

8. Определить числа зубьев зубчатого колеса и шестерни по формулам (1.12) и (1.13). Значения  $Z_1$  и  $Z_2$  округляются до целых.

9. Определить уточненное значение передаточного числа тяговой передачи по формуле (1.14) с точностью до трех знаков после запятой.

10. Выполнить проверку условия (1.15).

11. Определить эффективные мощности электровоза в часовом и номинальном режимах по формулам (1.16) и (1.17) с точностью до целых.

12. Определить скорости движения электровоза в часовом и номинальном режимах по формулам (1.18) и (1.19) с точностью до одного знака после запятой.

13. Определить подводимую к тяговой передаче мощность по формулам (1.20) и (1.21) с точностью до одного знака после запятой.

14. Определить КПД зубчатой передачи в часовом и номинальном режимах, используя табл. 1.3 и формулу (1.22). Точность расчетов по формуле до трех знаков после запятой.

15. Определить вращающий момент на валу тягового двигателя в часовом режиме по формуле (1.23).

16. Определить силу тяги электровоза в часовом и номинальном режимах по формулам (1.24) и (1.25). Точность расчетов – до целых.

17. Выполнить проверку сцепной массы по условию (1.26) или (1.30).

18. Определить минимальную длину электровоза по осям автосцепок по формуле (1.32) с точностью до двух знаков после запятой.

19. Используя табл. 2 или 3 прил. 1, принять значение длины электровоза по осям автосцепок  $L_{\text{л}}$ .

20. Определить жесткую базу электровоза по формуле (1.33) с точностью до двух знаков после запятой.

## **2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ РАЗМЕРОВ ЭКИПАЖНОЙ ЧАСТИ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЕЧЕНИЙ РАМЫ ТЕЛЕЖКИ**

### **2.1. Определение основных размеров тележки и экипажной части**

На первой стадии разработки эскизного проекта механической части электровоза необходимо определить основные размеры тележки:

– жесткую базу тележки (расстояние между осями крайних колесных пар тележки);

- длину, ширину и высоту тележки;
  - размеры балок, образующих раму тележки.
- Основные размеры тележки показаны на рис. 2.1.

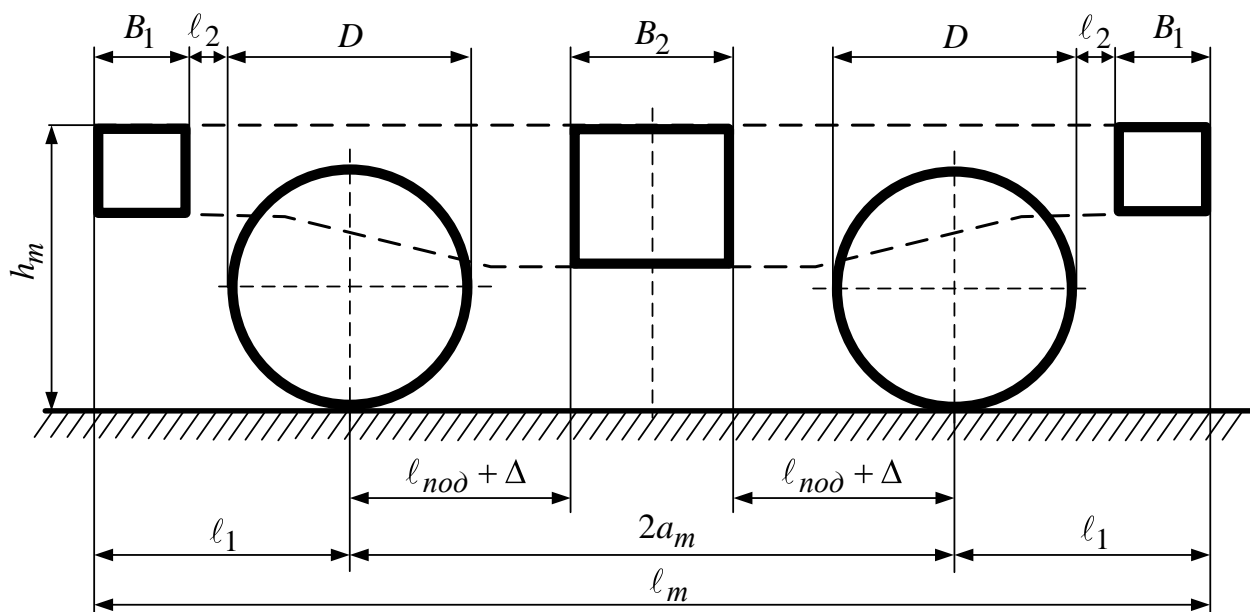


Рис. 2.1. Расчетная схема для определения основных размеров тележки

Жесткая база тележки при любом способе подвешивания тяговых электродвигателей рассчитывается по формуле

$$2a_m = 2 \ell_{nod} + B_2 + 2 \Delta, \quad (2.1)$$

где  $\ell_{nod}$  – расстояние между точками подвешивания тягового двигателя на раме тележки, м (табл. 1.1);  $B_2$  – ширина средней поперечной балки рамы тележки, м. Размер  $B_2$  принимается в интервале от 0,5 до 0,65 м;  $\Delta$  – зазор между опорными кронштейнами и поперечной балкой рамы, зависящий от способа подвешивания тяговых двигателей, м. При опорно-осевом подвешивании тяговых двигателей  $\Delta$  рекомендуется от 0,02 до 0,025 м, а при опорно-рамном подвешивании – от 0,04 до 0,05 м [5].

Диаметр колеса колесной пары по окружности гребня рассчитывается по формуле

$$D = D_k + 0,06. \quad (2.2)$$

Расстояние от геометрической оси колесной пары до торца концевой поперечной балки рассчитывается по формуле

$$\ell_1 = \frac{D}{2} + \ell_2 + B_1, \quad (2.3)$$

где  $B_1$  – ширина концевых поперечных балок рамы тележки, рекомендуется принять в интервале от 0,1 до 0,25 м;  $\ell_2$  – расстояние между гребнем бандажа и поперечной концевой балкой рамы тележки, рекомендуется принять в интервале от 0,05 до 0,3 м.

Длина рамы тележки рассчитывается по формуле

$$\ell_m = 2 \ell_1 + 2a_m. \quad (2.4)$$

Высоту тележки от уровня головки рельса до верхней горизонтальной плоскости рамы  $h_m$  рекомендуется принять в интервале от 1,16 до 1,215 м, а ширину рамы тележки по осевым линиям боковин  $b_m$  – в интервале от 2,1 до 2,2 м.

Так как боковины рам двухосных тележек имеют различную высоту сечений концевых частей и средней части, то для дальнейших расчетов необходимо определить длины этих частей, а также длину переходных частей боковины.

Длина концевой части боковины рассчитывается по формуле

$$\ell_{кчб} = (0,1 \div 0,12) \ell_m, \quad (2.5)$$

а длина средней части боковины – по формуле

$$\ell_{счб} = (0,23 \div 0,26) \ell_m. \quad (2.6)$$

Тогда длина переходной части боковины может быть определена по формуле

$$\ell_{нчб} = \frac{\ell_m - \ell_{счб} - 2\ell_{кчб}}{2}. \quad (2.7)$$

После выполненных округлений необходимо уточнить длину рамы тележки по формуле

$$\ell_m = 2\ell_{кчб} + 2\ell_{нчб} + \ell_{счб}. \quad (2.8)$$

Для повышения прочности конструкции рамы тележки в средней части боковины к верхнему горизонтальному листу может привариваться усиливающая накладка. Длина усиливающей накладки рассчитывается как

$$\ell_n = (0,45 \div 0,47) \ell_m. \quad (2.9)$$

После определения основных размеров тележки рассчитывается и составляется компоновочная схема экипажной части электровоза (или секции для многосекционных электровозов) с использованием рис. 2.2.

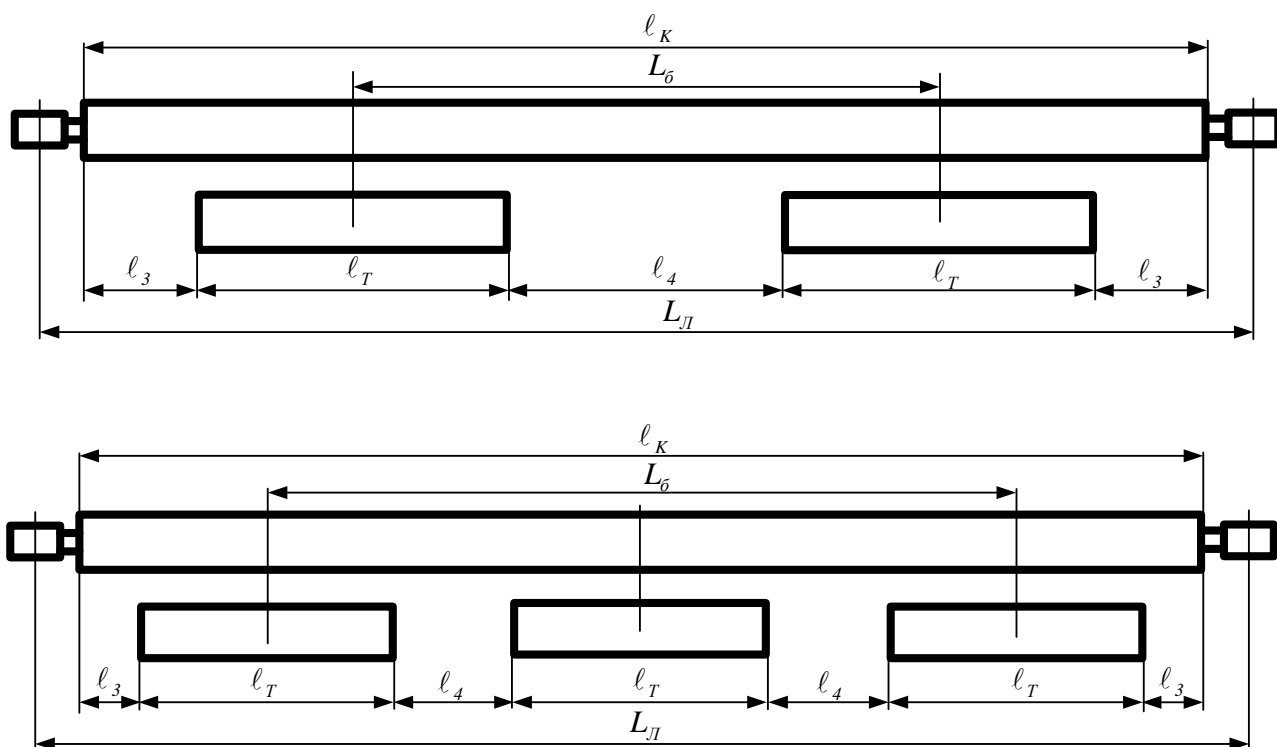


Рис. 2.2. Компонувочные схемы экипажной части электровозов

Длина рамы кузова электровоза (секции) определяется по формуле

$$\ell_K = \frac{L_{\text{Л}}}{n_c} - 1,22. \quad (2.10)$$

Расстояние между смежными тележками электровоза (секции) – по формулам:

- для электровоза (секции) с двумя двухосными тележками

$$\ell_4 = \ell_K - 2 \ell_3 - 2 \ell_m; \quad (2.11)$$

- для электровоза (секций) с тремя двухосными тележками

$$\ell_4 = \frac{\ell_K - 2 \ell_3 - 3 \ell_m}{2}. \quad (2.12)$$

где  $\ell_3$  – расстояние от торцов рамы кузова до торцов рам крайних тележек электровоза (секции) рекомендуется принять в интервале от 1,42 до 1,55 м.

Расстояние  $\ell_4$ , рассчитанное по формуле (2.11), по условиям компоновки ходовых частей не должно быть меньше 2,5 м; это же расстояние, рассчитанное по формуле (2.12), не должно быть меньше 2 м. Если соответствующее условие не выполняется, необходимо уменьшить по

возможности  $\ell_3$  или, если уменьшение  $\ell_3$  невозможно или не дает результата, увеличить  $L_n$  и повторить расчет, начиная с формулы (2.10).

После расчета параметров по формулам (2.10) и (2.11) или (2.10) и (2.12), необходимо определить уточненную жесткую базу электровоза по формулам:

- для электровоза (секции) с двумя двухосными тележками

$$L_{\bar{o}} = \ell_4 + \ell_m; \quad (2.13)$$

- для электровоза (секции) с тремя двухосными тележками

$$L_{\bar{o}} = 2\ell_4 + 2\ell_m. \quad (2.14)$$

## 2.2. Определение геометрических размеров сечений балок рамы тележки

Расчет геометрических размеров сечений балок рамы тележки с использованием рис. 2.3, а, б необходимо представить в виде табл. 2.1, строго придерживаясь указанной размерности параметров.

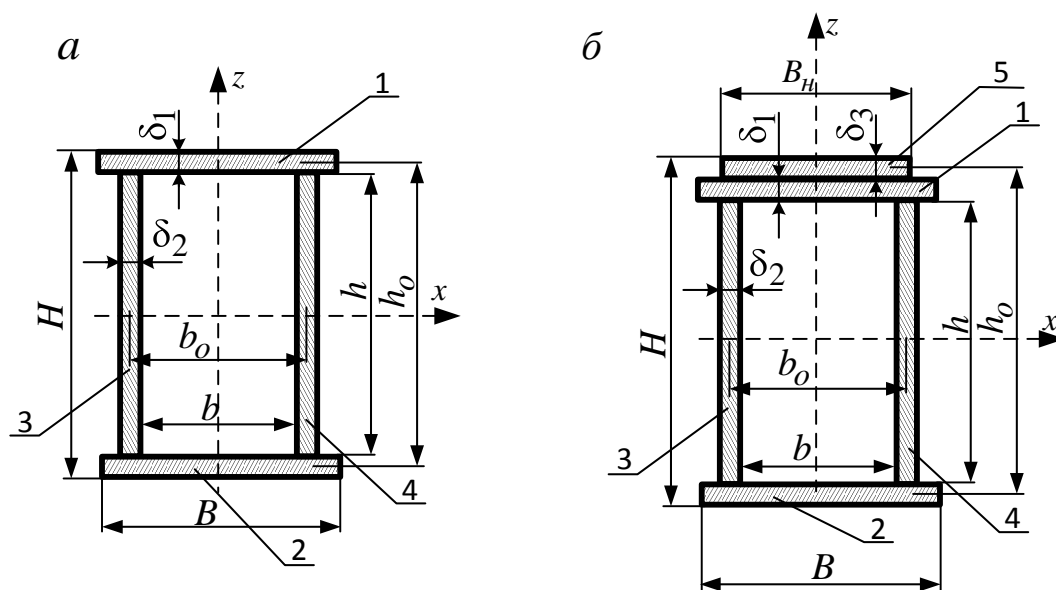


Рис. 2.3. Сечения балок рамы тележки: а – сечение без усиливающей накладки; б – сечение с усиливающей накладкой; 1 – верхний горизонтальный лист; 2 – нижний горизонтальный лист; 3 – левый вертикальный лист; 4 – правый вертикальный лист; 5 – усиливающая накладка

В гр. 2, 3, 8, 9 и 10 табл. 2.1 принимаются:



– размер  $B$  для концевой и средней частей боковины одинаковым в интервале от 0,18 до 0,22 м;



- размер  $H$  для концевых поперечных балок и концевых частей боковины одинаковым в интервале от 0,18 до 0,2 м;
- высота  $H$  для боковины в средней ее части и средней поперечной балки в интервале от 0,35 до 0,45 м;
- толщина листов, образующих сечение,  $\delta_1$ ,  $\delta_2$  и  $\delta_3$  в интервале от 0,01 до 0,016 м.

Таблица 2.1

**Размеры и расчетные данные сечений рамы тележки**

Элемент рамы	$B$ , $10^{-3}\cdot\text{м}$	$H$ , $10^{-3}\cdot\text{м}$	$h$ , $10^{-3}\cdot\text{м}$	$b$ , $10^{-3}\cdot\text{м}$	$h_0$ , $10^{-3}\cdot\text{м}$	$b_0$ , $10^{-3}\cdot\text{м}$	 , $10^{-3}\cdot\text{м}$	 , $10^{-3}\cdot\text{м}$	$\delta_3$ , $10^{-3}\cdot\text{м}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Концевая поперечная балка	$B_1$								
Концевая часть боковины									
Средняя часть боковины									
Средняя поперечная балка	$B_2$								

Следует отметить, что толщина вертикальных и горизонтальных листов может быть как одинаковой, так и различной, при этом горизонтальные листы следует выбирать большими, чем вертикальные.

Параметры  $B$  для концевой и средней поперечных балок рамы тележки принимаются равными ранее принятым  $B_1$  и  $B_2$  соответственно.

Параметры в гр. 4, 5, 6 и 7 табл. 2.1 определяются:

– расчетная высота вертикального листа для сечений без усиливающей накладки по формуле

$$h = H - 2 \delta_1, \quad (2.15)$$

а для сечения с усиливающей накладкой – по формуле

$$h = H - 2 \delta_1 - \delta_3; \quad (2.16)$$

– расстояние между внутренними поверхностями вертикальных листов, образующих сечение, по формуле

$$b = B - 2 \delta_2 - 2 \Delta_1, \quad (2.17)$$

где  $\Delta_1$  – вылет концов горизонтальных листов под сварной шов, который можно принять 0,02 м;

– высота сечения по средним линиям составляющих его элементов для сечений без усиливающих накладок по формуле

$$h_o = h + \delta_1, \quad (2.18)$$

а для сечения с усиливающей накладкой по формуле

$$h_o = h + \delta_1 + \delta_3/2; \quad (2.19)$$

– ширина сечения по средним линиям составляющих его элементов для всех сечений рамы тележки по формуле

$$b_o = b + \delta_2; \quad (2.20)$$

– расчетная ширина усиливающей накладки по формуле

$$B_n = B - 2 \Delta_1, \quad (2.21)$$

где  $B$  – ширина сечения средней части боковины, определяемая по табл. 2.1.

### 2.3. Расчет геометрических характеристик сечений рамы тележки

Необходимо определить следующие геометрические характеристики сечений:

- моменты инерции при изгибе в вертикальной плоскости  $I_x$ ;
- моменты инерции при изгибе в горизонтальной плоскости  $I_z$ ;
- моменты инерции при кручении  $I_k$ ;
- моменты сопротивления при изгибе в вертикальной плоскости  $W_x$ ;
- моменты сопротивления при изгибе в горизонтальной плоскости  $W_y$ ;
- моменты сопротивления при кручении  $W_k$ .

Расчет указанных геометрических характеристик для сечения каждого элемента рамы тележки выполняется в табличной форме. Если сечения элементов рамы тележки выполнены без усиливающей накладки, то для расчета используются табличные формы по образцу табл. 2.2, при заполнении которых необходимо строго придерживаться указанной в них размерности.

Площади верхнего и нижнего горизонтальных листов рассчитываются по формуле

$$F_{1,2} = B \delta_1, \quad (2.22)$$

а площади левого и правого вертикальных листов – по формуле

$$F_{3,4} = h \delta_2. \quad (2.23)$$

Таблица 2.2

**Вспомогательные параметры  
для (наименование элемента рамы)**

Элемент сечения	$F_i,$ $10^{-4} \cdot \text{м}^2$	$z_i,$ $10^{-3} \cdot \text{м}$	$x_i,$ $10^{-3} \cdot \text{м}$	$z_i^2 F_i,$ $10^{-6} \cdot \text{м}^4$	$x_i^2 F_i,$ $10^{-6} \cdot \text{м}^4$	$I'_{xi},$ $10^{-6} \cdot \text{м}^4$	$I'_{zi},$ $10^{-6} \cdot \text{м}^4$
1	2	3	4	5	6	7	8
Верхний горизонтальный лист	$F_1$	$z_1$	$x_1$				
Нижний горизонтальный лист	$F_2$	$z_2$	$x_2$				
Левый вертикальный лист	$F_3$	$z_3$	$x_3$				
Правый вертикальный лист	$F_4$	$z_4$	$x_4$				
СУММА							

Ординаты собственных центров тяжести горизонтальных листов определяются по формуле

$$z_{1,2} = \pm h_o / 2, \quad (2.24)$$

где знак «+» относится к верхнему горизонтальному листу, а знак «–» – к нижнему. Для вертикальных листов ординаты собственных центров тяжести равны нулю, т. е.  $z_{3,4} = 0$ .

Абсциссы собственных центров тяжести для горизонтальных листов равны нулю, т. е.  $x_{1,2} = 0$ , а для вертикальных листов рассчитываются по формуле

$$x_{4,3} = \pm b_o / 2, \quad (2.25)$$

где знак «+» относится к правому вертикальному листу, а знак «–» – к левому.

На следующем этапе рассчитываются параметры гр. 5 и 6 табл. 2.2 с использованием данных гр. 2, 3 и 4, вычисленных по формулам (2.22)–(2.25).

Моменты инерции при изгибе для составляющих сечение элементов рассчитываются по следующим формулам:

- для горизонтальных листов

$$I'_x = \frac{B \delta_1^3}{12}; \quad (2.26)$$

$$I'_z = \frac{B^3 \delta_1}{12}; \quad (2.27)$$

- для вертикальных листов




$$I'_x = \frac{\delta_2 h^3}{12}; \quad (2.28)$$

$$I'_z = \frac{h \delta_2^3}{12}. \quad (2.29)$$

На последнем этапе вычисляются суммы чисел по гр. 2–8 с учетом их знаков и записываются в строку «Сумма» табл. 2.2. Аналогично по форме табл. 2.2 рассчитываются геометрические характеристики других сечений, не имеющих усиливающей накладки. При расчете геометрических характеристик для сечения средней части боковины в случае применения усиливающей накладки используется табл. 2.3.

Таблица 2.3

**Вспомогательные параметры для средней части боковины рамы тележки с усиливающей накладкой**

Элемент сечения	$F_i,$ $10^{-4} \cdot \text{м}^2$	$z'_i,$ $10^{-3} \cdot \text{м}$	$z_i,$ $10^{-3} \cdot \text{м}$	$x_i,$ $10^{-3} \cdot \text{м}$	$z_i^2 F_i,$ $10^{-6} \cdot \text{м}^4$	$x_i^2 F_i,$ $10^{-6} \cdot \text{м}^4$	$I'_{xi},$ $10^{-6} \cdot \text{м}^4$	$I'_{zi},$ $10^{-6} \cdot \text{м}^4$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Верхний горизонтальный лист	$F_1$	$z'_1$						
Нижний горизонтальный лист	$F_2$	$z'_2$	$z_2$	$x_2$				
Левый вертикальный лист	$F_3$	$z'_3$	$z_3$	$x_3$				
Правый вертикальный лист	$F_4$	$z'_4$	$z_4$					
Усиливающая накладка	$F_5$	$z'_5$	$z_5$	$x_5$				
СУММА								

Площади горизонтальных и вертикальных листов для сечения средней части боковины рамы тележки рассчитываются по формулам (2.22) и (2.23), а площадь усиливающей накладки определяется по формуле

$$F_5 = B_n \delta_3. \quad (2.30)$$

Ординаты собственных центров тяжести горизонтальных листов в этом случае определяются по формуле

$$z'_{1,2} = \pm(h + \delta_1)/2, \quad (2.31)$$

где знак «+» относится к верхнему горизонтальному листу, а знак «–» – к нижнему. Для вертикальных листов ординаты собственных центров рав-

ны нулю, т. е.  $z_{3,4} = 0$ . Ордината собственного центра тяжести усиливающей накладки рассчитывается по формуле

$$z'_5 = h/2 + \delta_1 + \delta_3/2. \quad (2.32)$$

На следующем этапе расчета необходимо, предварительно вычислив сумму чисел гр. 2 табл. 2.3, определить ординату центра тяжести всего сечения средней части боковины с усиливающей накладкой, используя для этого данные гр. 2 и 3 указанной таблицы:

$$z_c = \frac{\sum_1^n z'_i F_i}{\sum_1^n F_i}. \quad (2.33)$$

Ординаты центров тяжести составляющих сечение элементов относительно нейтральных осей всего сечения (гр. 4 табл. 2.3) рассчитываются для каждого элемента с использованием соответствующего числа из гр. 3 указанной таблицы и значения  $z_c$  по формуле

$$z_i = z'_i - z_c. \quad (2.34)$$

Абсциссы собственных центров тяжести (гр. 5 табл. 2.3) для горизонтальных листов и для усиливающей накладки равны нулю, т. е.  $x_{1,2} = 0$  и  $x_5 = 0$ , а для вертикальных листов рассчитываются по формуле (2.25).

На следующем этапе с использованием данных гр. 2, 4 и 5 рассчитываются значения параметров для гр. 6 и 7 табл. 2.3, после чего по формулам (2.26)–(2.29) определяются значения параметров гр. 8 и 9 указанной таблицы для горизонтальных и вертикальных листов. Моменты инерции при изгибе для усиливающей накладки рассчитываются по формулам:

$$I'_x = \frac{B_n \delta_3^3}{12}, \quad (2.35)$$

$$I'_z = \frac{B_n^3 \delta_3}{12} \quad (2.36)$$

и записываются в соответствующие графы табл. 2.3.

На последнем этапе вычисляются суммы чисел по гр. 3–9 с учетом их знаков и записываются в строку «Сумма» табл. 2.3.

Моменты инерции при изгибе и кручении для поперечных сечений каждого элемента рамы тележки рассчитываются с использованием табл. 2.2 и табл. 2.3 (при наличии усиливающей накладки) по следующим формулам [7]:

$$I_x = \sum_1^n (z_i^2 F_i) + \sum_1^n I'_{xi}; \quad (2.37)$$

$$I_z = \sum_1^n (x_i^2 F_i) + \sum_1^n I'_{zi}; \quad (2.38)$$

$$I_K = \frac{h_o^2 b_o^2 \delta_1 \delta_2}{H \delta_1 + B \delta_2 - \delta_1^2 - \delta_2^2}. \quad (2.39)$$

Расчет моментов сопротивления при изгибе для сечений без усиливающей накладки выполняется по формулам:

$$W_x = \frac{I_x}{0,5 H}; \quad (2.40)$$

$$\text{,} \quad (2.41)$$

а для сечения с усиливающей накладкой – по формуле

$$W_x = \frac{I_x}{z_c + 0,5 H} \quad (2.42)$$

и формуле (2.41).

Моменты сопротивления при кручении для всех сечений элементов рамы тележки определяются по формуле

$$W_K = 2 h_o b_o \delta_1. \quad (2.43)$$

Результаты расчетов по формулам (2.37)–(2.43) сводятся в табл. 2.4 с соблюдением указанной в ней размерности.

Таблица 2.4

**Моменты инерции и моменты сопротивления элементов рамы тележки при изгибе и кручении**

Элемент рамы	$I_x,$ $10^{-6} \cdot \text{м}^4$	$I_z,$ $10^{-6} \cdot \text{м}^4$	$I_K,$ $10^{-6} \cdot \text{м}^4$	$W_x,$ $10^{-3} \cdot \text{м}^3$	$W_z,$ $10^{-3} \cdot \text{м}^3$	$W_K,$ $10^{-3} \cdot \text{м}^3$
1	2	3	4	5	6	7
Концевая поперечная балка						
Концевая часть боковины						
Средняя часть боковины						
Средняя поперечная балка						

## 2.4. Определение массы элементов экипажной части и составление весовой ведомости

Определение массы отдельных элементов механической части электровоза, а также массы тележек и кузова в сборе имеет важное значение не только для последующих расчетов прочности и надежности этих элементов, но и для выполнения статической развески локомотива. Под статической развеской понимают равномерное распределение массы локомотива по отдельным колесным парам и колесам путем соответствующего расположения оборудования. Развеска влияет на тяговые свойства локомотива, так как разница нагрузок колесных пар приводит к склонности наименее нагруженных колесных пар к боксованию.

При выполнении статической развески составляется весовая ведомость локомотива, представляющая таблицу с указанием массы отдельных элементов оборудования, его количества и расположения центров тяжести. В курсовом проекте необходимо рассчитать упрощенную весовую ведомость, примером которой для грузового электровоза является табл. 2.5, а для пассажирского – табл. 2.6.

Таблица 2.5

### Упрощенная весовая ведомость грузового электровоза

Наименование оборудования	Масса единицы оборудования, т	Количество единиц оборудования	Масса оборудования, т
1	2	3	4
Передняя поперечная балка рамы	$M_{кпб}$	$n_m$	$n_m M_{кпб}$
Средняя поперечная балка рамы	$M_{спб}$	$n_m$	$n_m M_{спб}$
Задняя поперечная балка рамы	$M_{кпб}$	$n_m$	$n_m M_{кпб}$
Боковина рамы	$M_{б}$	$2n_m$	$2n_m M_{б}$
Кронштейны крепления поводковых букс	$M_{ккпб}$	$n_m$	$n_m M_{ккпб}$
<b>Рама тележки в сборе</b>	$M_{птсб}$	$n_m$	$n_m M_{птсб}$
Унифицированная колесная пара с двумя зубчатыми колесами	$M_{кп}$	$n_{кп}$	$n_{кп} M_{кп}$
Тяговый двигатель	$M_{тэд}$	$n_{кп}$	$n_{кп} M_{тэд}$
Поводковая букса	$M_{букс}$	$2n_{кп}$	$2n_{кп} M_{букс}$
Зубчатая шестерня	$M_{ш}$	$2n_{кп}$	$2n_{кп} M_{ш}$

Окончание табл. 2.5

Наименование оборудования	Масса единицы оборудования, т	Количество единиц оборудования	Масса оборудования, т
1	2	3	4
Кронштейн подвески тягового двигателя	$M_{кпд}$	$n_{кп}$	$n_{кп}M_{кпд}$
Кожух зубчатой передачи	$M_{кзп}$	$2n_{кп}$	$2n_{кп}M_{кзп}$
<b>Колесно-моторный блок в сборе</b>	$M_{кмб}$	$n_{кп}$	$n_{кп}M_{кмб}$
Листовая рессора	$M_{лр}$	$2n_{кп}$	$2n_{кп}M_{лр}$
Цилиндрическая однорядная пружина	$M_{пр}$	$4n_{кп}$	$4n_{кп}M_{пр}$
<b>Первая ступень рессорного подвешивания в сборе</b>	$M_{брп}$	$n_{кп}$	$n_{кп}M_{брп}$
<b>Тормозное оборудование</b>	$M_{то}$	$n_m$	$n_mM_{то}$
<b>Устройство связи с кузовом</b>	$M_{ту}$	$n_m$	$n_mM_{ту}$
<b>Пневматический монтаж и прочие детали</b>	$M_{пнев}$	$n_m$	$n_mM_{пнев}$
<b>Тележка в сборе</b>	$M_t$	$n_m$	$n_mM_t$
<b>Кузов с оборудованием</b>	$M_k/n_c$	$n_c$	$M_k$
<b>Электровоз в целом</b>	$M_{сц}/n_c$	$n_c$	$M_{сц}$

Таблица 2.6

## Упрощенная весовая ведомость пассажирского электровоза

Наименование оборудования	Масса единицы оборудования, т	Количество единиц оборудования	Масса оборудования, т
1	2	3	4
Передняя поперечная балка рамы	$M_{кпб}$	$n_m$	$n_mM_{кпб}$
Средняя поперечная балка рамы	$M_{спб}$	$n_m$	$n_mM_{спб}$
Задняя поперечная балка рамы	$M_{кпб}$	$n_m$	$n_mM_{кпб}$
Боковина рамы	$M_б$	$2n_m$	$2n_mM_б$
Кронштейны крепления поводковых букс	$M_{ккпб}$	$n_m$	$n_mM_{ккпб}$



Окончание табл. 2.6

Наименование оборудования	Масса единицы оборудования, т	Количество единиц оборудования	Масса оборудования, т
1	2	3	4
<b>Рама тележки в сборе</b>	$M_{птсб}$	$n_m$	
Колесная пара с двумя зубчатыми колесами	$M_{кп}$	$n_{кп}$	
Тяговый двигатель	$M_{тэд}$	$n_{кп}$	$n_{кп} M_{тэд}$
Подвеска тягового двигателя	$M_{нд}$	$n_{кп}$	$n_{кп} M_{нд}$ $M_{нд}$
Тяговый редуктор	$M_{тр}$	$n_{кп}$	$n_{кп} M_{тр}$
Передаточный механизм тягового момента	$M_{пм}$	$n_{кп}$	$n_{кп} M_{пм}$
<b>Колесно-моторный блок в сборе</b>	$M_{кмб}$		$n_{кп} M_{кмб}$
<b>Первая ступень рессорного подвешивания в сборе</b>	$M_{бпр}$	$n_{кп}$	$n_{кп} M_{бпр}$
<b>Тормозное оборудование</b>	$M_{то}$	$n_m$	$n_m M_{то}$
<b>Устройство связи с кузовом</b>		$n_m$	$n_m M_{ту}$
<b>Пневматический монтаж и прочие детали</b>	$M_{пнев}$	$n_m$	
<b>Тележка в сборе</b>	$M_m$	$n_m$	$n_m M_m$
<b>Кузов с оборудованием</b>	$M_k / n_c$	$n_c$	$M_k$
<b>Электровоз в целом</b>	$M_{сц} / n_c$	$n_c$	$M_{сц}$

### Расчетные формулы для грузового электровоза (табл. 2.5)

Массы концевых поперечных балок рамы тележки рассчитываются по формуле

$$M_{кпб} = \gamma_c (b_m - B) F_{кпб}, \quad (2.44)$$

где  $\gamma_c$  – объемная масса стали, принимается  $7,8 \text{ т/м}^3$ ;  $B$  – ширина балки, определяемая по табл. 2.1, м;  $F_{кпб}$  – площадь сечения концевой поперечной балки,  $\text{м}^2$ , определяемая по строке «Сумма» гр. 2 табл. 2.2.

Масса средней поперечной балки рассчитывается по аналогичной формуле

$$M_{снб} = \gamma_c (b_m - B) F_{снб}, \quad (2.45)$$

где  $F_{cnб}$  – площадь сечения средней поперечной балки,  $\text{м}^2$ , определяемая по строке «Сумма» гр. 2 табл. 2.2.

Так как боковина рамы тележки имеет сложную конфигурацию по высоте, то ее масса определяется как совокупность масс отдельных составляющих частей. Масса концевой части боковины определяется по формуле

$$M_{кчб} = \gamma_c \ell_{кчб} F_{кчб}, \quad (2.46)$$

где  $F_{кчб}$  – площадь сечения концевой части боковины, определяемая по строке «Сумма» гр. 2 табл. 2.2,  $\text{м}^2$ .

Масса средней части боковины рассчитывается по формуле

$$M_{счб} = \gamma_c \ell_{счб} F_{счб}, \quad (2.47)$$

где  $F_{счб}$  – площадь сечения средней части боковины,  $\text{м}^2$ , определяемая по строке «Сумма» гр. 2 табл. 2.3 за вычетом площади поперечного сечения усиливающей накладки, по формуле

$$F_{счб} = \sum_1^n F_i - F_5, \quad (2.48)$$

где  $\sum_1^n F_i$  – сумма площадей отдельных элементов, составляющих сечение средней части боковины.

Масса переходной части боковины определяется по формуле

$$M_{нчб} = \gamma_c \left[ \ell_{нчб} B \delta_1 + 2 \ell_{нчб} \left( \frac{h_{счб} - h_{кчб}}{2} \right) \delta_2 + B \delta_1 \sqrt{\ell_{нчб}^2 + H_{счб}^2 - H_{кчб}^2} \right], \quad (2.49)$$

где  $B$  – ширина средней части боковины, определяемая по табл. 2.1, м;  $h_{счб}$ ,  $h_{кчб}$  – значения расчетной высоты вертикальных листов сечений средней и концевой частей боковины соответственно, определяемые по табл. 2.1, м;  $H_{счб}$ ,  $H_{кчб}$  – значения высоты сечений средней и концевой частей боковины соответственно, определяемые по табл. 2.1, м.

Масса усиливающей накладки рассчитывается по формуле

$$M_n = \gamma_c \ell_n F_5. \quad (2.50)$$

Масса боковины рамы тележки в целом определяется по формуле

$$M_{\bar{o}} = 2 M_{кч\bar{o}} + 2 M_{нч\bar{o}} + M_{сч\bar{o}} + M_n. \quad (2.51)$$

Масса кронштейнов для крепления поводковых букс, приходящаяся на одну тележку электровоза, определяется по формуле

$$M_{ккп\bar{o}} \approx 0,7 M_{\bar{o}}. \quad (2.52)$$

Масса рамы тележки в сборе представляет собой сумму масс составляющих ее элементов и рассчитывается по формуле

$$M_{рмс\bar{o}} = 2 M_{кп\bar{o}} + M_{сн\bar{o}} + 2 M_{\bar{o}} + M_{ккп\bar{o}}. \quad (2.53)$$

Число тележек электровоза  $n_m$  и осей колесных пар  $n_{кп}$  определяется в соответствии с осевой формулой, указанной в задании на курсовой проект.

Рекомендуется принять массы [6, 7, 9]:

- унифицированной колесной пары  $M_{кп}$  с учетом массы двух зубчатых колес 2,623 т;
- тягового двигателя  $M_{тэд}$  в соответствии с параметрами заданного ТЭД;
- поводковой буксы  $M_{букс} = 0,311$  т;
- зубчатой шестерни  $M_{ш}$  в интервале от 0,011 до 0,018 т;
- кронштейна подвески тягового двигателя  $M_{кпд} = 0,04$  т;
- кожуха зубчатой передачи  $M_{кзн}$  в интервале от 0,08 до 0,15 т;
- листовой рессоры  $M_{лр}$  в интервале от 0,135 до 0,19 т;
- пружины  $M_{пр}$  в интервале от 0,021 до 0,04 т;
- тормозного оборудования  $M_{то}$  в интервале от 0,95 до 0,985 т в расчете на одну тележку;
- тягового устройства (связи кузова с тележкой)  $M_{ту} = 0,188$  т в расчете на одну тележку;
- пневматического монтажа и прочих мелких деталей  $M_{пнев}$  в расчете на одну тележку 0,08 т.

Масса колесно-моторного блока в сборе рассчитывается по формуле

$$M_{км\bar{o}} = M_{кп} + M_{тэд} + 2 M_{букс} + 2 M_{ш} + M_{кпд} + 2 M_{кзн}. \quad (2.54)$$

Масса комплекта буксового рессорного подвешивания в расчете на одну колесную пару определяется по формуле

$$M_{\delta pn} = 2 M_{\delta p} + 4 M_{np}. \quad (2.55)$$

Масса тележки в сборе рассчитывается по формуле

$$M_t = M_{pm\delta} + 2 M_{km\delta} + 2 M_{\delta pn} + M_{to} + M_{ty} + M_{пневм}. \quad (2.56)$$

Масса кузова с оборудованием для электровоза в целом определяется по формуле

$$M_k = M_{cy} - n_m M_t. \quad (2.57)$$

### **Расчетные формулы для пассажирского электровоза** (табл. 2.6)

Массы  $M_{kn\delta}$ ,  $M_{cn\delta}$ ,  $M_{\delta}$ ,  $M_{kkn\delta}$ ,  $M_{pm\delta}$  рассчитываются также, как и для грузового электровоза, по формулам (2.44), (2.45), (2.51), (2.52) и (2.53).

Рекомендуется принять массы [10, 11]:

- колесной пары  $M_{kn}$  с учетом массы зубчатых колес 2,57 т;
- тягового двигателя  $M_{m\delta d}$  в соответствии с параметрами заданного ТЭД;

– подвески тягового двигателя  $M_{nd} = 0,06$  т;

– тягового редуктора  $M_{mp} = 1,15$  т;

– передаточного механизма тягового момента  $M_{nm} = 0,12$ ;

– первой ступени рессорного подвешивания в сборе  $M_{\delta pn} = 0,2$  т.

Масса колесно-моторного блока в сборе для пассажирского электровоза рассчитывается по формуле

$$M_{km\delta} = M_{kn} + M_{m\delta d} + M_{nd} + M_{mp} + M_{nm}. \quad (2.58)$$

Массы  $M_{to}$ ,  $M_{ty}$ ,  $M_{пневм}$ ,  $M_t$ ,  $M_k$  выбираются и рассчитываются аналогично грузовому электровозу по формулам (2.56), (2.57).

## **Оформление шага по разделу 2**

### **Подраздел 2.1**

1. В пояснительной записке представить расчетную схему тележки (рис. 2.1), на которой указать все рассчитываемые размеры.

2. Рассчитать жесткую базу тележки по формуле (2.1) с точностью до двух знаков после запятой.

3. Рассчитать по формуле (2.2) диаметр колеса колесной пары по окружности гребня с точностью до двух знаков после запятой.

4. Рассчитать расстояние  $\ell_1$  по формуле (2.3) с точностью до трех знаков после запятой.

5. Рассчитать длину рамы тележки  $\ell_m$  по формуле (2.4) с точностью до двух знаков после запятой.

6. Принять, используя рекомендации, высоту и ширину тележки.

7. Рассчитать длины участков боковины рамы тележки, используя формулы (2.5)–(2.7), точность расчетов – до двух знаков после запятой.

8. Рассчитать уточненную длину рамы тележки по формуле (2.8) с точностью до двух знаков после запятой.

9. Рассчитать длину усиливающей накладки по формуле (2.9).

10. Представить компоновочную схему экипажной части электровоза для одной секции в соответствии с заданной осевой формулой, используя рис. 2.2. На схеме указать все рассчитываемые или принятые размеры.

11. Рассчитать длину рамы кузова электровоза по формуле (2.10) с точностью до двух знаков после запятой.

12. Рассчитать размеры  $\ell_4$  по формулам (2.11) или (2.12) с выполнением условия, точность расчетов – до трех знаков после запятой.

13. Определить уточненную жесткую базу кузова электровоза по формуле (2.13) или (2.14), точность расчетов – до двух знаков после запятой.

## Подраздел 2.2

14. Представить табл. 2.1, в которой в гр. 2, 3, 8, 9 и 10 параметры принимаются в соответствии с рекомендациями, а в гр. 4–7 рассчитываются по формулам (2.15)–(2.20) соответственно.

15. Рассчитать ширину усиливающей накладки по формуле (2.21).

## Подраздел 2.3

16. Рассчитать параметры в табл. 2.2 для концевых поперечных балок по формулам (2.22)–(2.29).

17. Рассчитать показатели в табл. 2.2 для средней поперечной балки, используя формулы (2.22)–(2.29).

18. Рассчитать параметры в табл. 2.2 для концевых частей боковины по формулам (2.22)–(2.29).

19. Рассчитать параметры в табл. 2.3 для средней части боковины, используя формулы (2.22)–(2.36).

20. Рассчитать параметры в табл. 2.4, используя формулы (2.37)–(2.43).

## Подраздел 2.4

21. В пояснительной записке привести упрощенную весовую ведомость в соответствии с заданным родом службы электровоза по форме табл. 2.5 или 2.6.

22. Произвести расчет параметров гр. 2 табл. 2.5 или 2.6, используя расчетные формулы и рекомендации, указанные ниже таблиц. Массы отдельных элементов рамы тележки определяются с точностью до трех знаков после запятой.

### 3. РАСЧЕТ РАМЫ ТЕЛЕЖКИ НА СТАТИЧЕСКУЮ И УСТАЛОСТНУЮ ПРОЧНОСТЬ

#### 3.1. Составление расчетной схемы рамы тележки и определение величины действующих нагрузок

В курсовом проекте производится расчет рамы тележки на прочность при действии одного из видов эксплуатационных нагрузок – статической вертикальной (весовой) нагрузки. При указанном виде нагрузки рама тележки представляет собой статически неопределимую систему, для расчета которой используется традиционно применяемый в электровозостроении метод сил [5, 6, 9].

Расчетная схема рамы тележки, с учетом симметрии конструкции относительно продольной оси, может быть получена путем условного разреза рамы по указанной оси, с закреплением (жесткая заделка) средней поперечной балки. При этом в местах разреза концевых поперечных балок прикладываются неизвестные силовые воздействия.

Расчетная схема рамы тележки грузового электровоза при опорно-осевом подвешивании тяговых двигателей имеет вид, показанный на рис. 3.1.

Расчетная схема рамы тележки пассажирского электровоза имеет вид, показанный на рис. 3.2.

Неизвестные силовые воздействия  $X_1$  и  $X_2$ , изображенные в местах разреза концевых поперечных балок на рис. 3.1 и 3.2, представляют собой сосредоточенные изгибающие моменты.

Численные значения сил  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ ,  $P_4$ ,  $R$  (рис. 3.1) определяются по ниже приведенным формулам.

Нагрузка  $P_1$  есть вес передней концевой балки и части боковины и определяется как

$$P_1 = \left( \frac{M_{кпб} + M_{б}}{2} + \frac{M_{ккпб}}{4} + \frac{M_{то}}{4} + \frac{M_{бпр}}{2} \right) 9,8, \quad (3.1)$$

где  $M_{кпб}$  – масса концевой поперечной балки;  $M_{б}$  – масса боковины;  $M_{ккпб}$  – масса кронштейнов крепления поводковых букс в расчете на одну тележку;  $M_{то}$  – масса тормозного оборудования в расчете на одну тележку;  $M_{бпр}$  – масса буксового рессорного подвешивания в расчете на одну колесную пару.

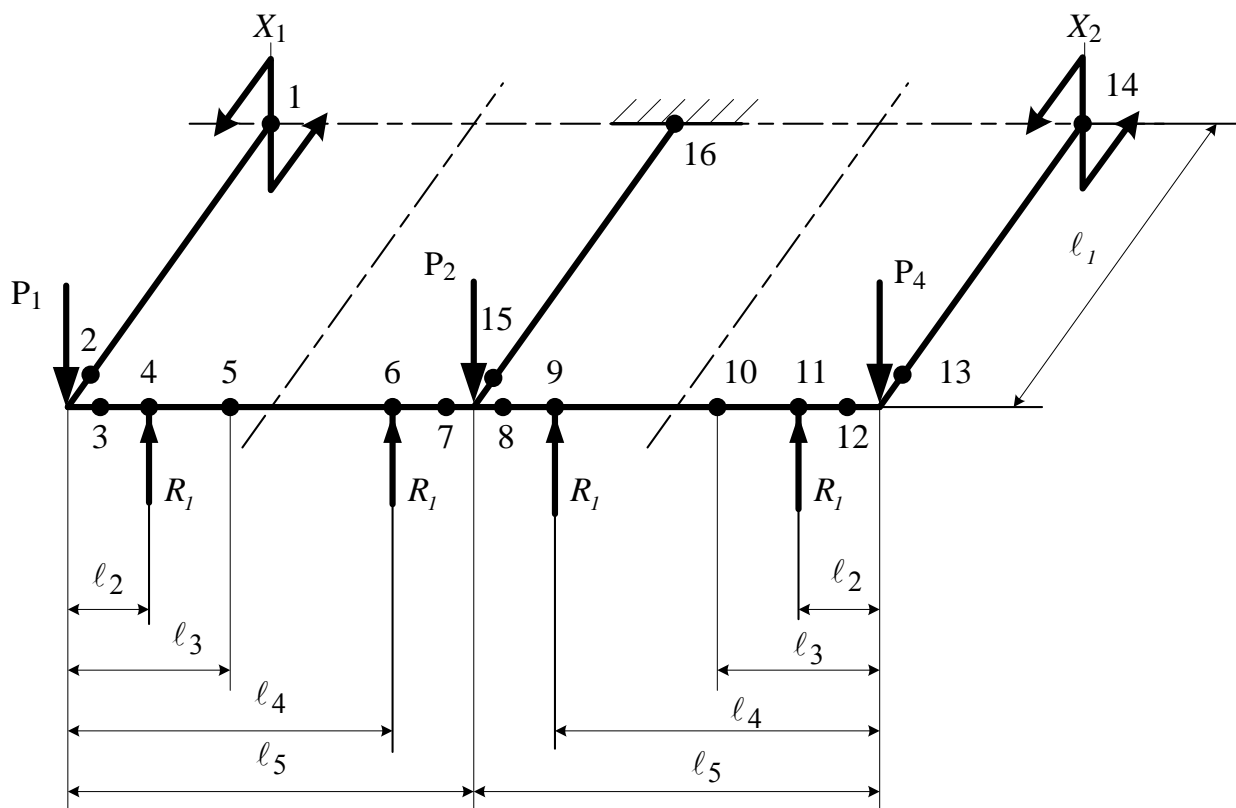


Рис. 3.1. Расчетная схема рамы тележки грузового электровоза

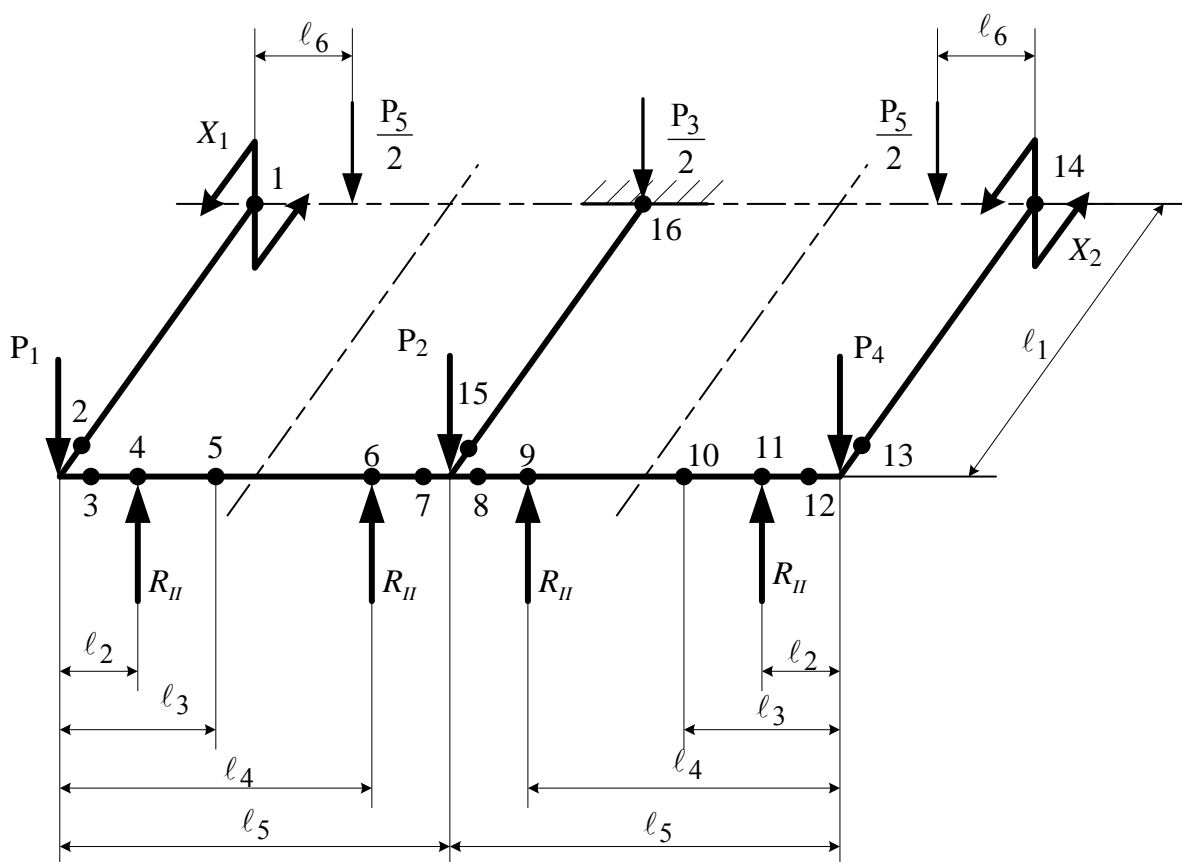


Рис. 3.2. Расчетная схема рамы тележки пассажирского электровоза

Нагрузка от кузова  $P_2$ , передаваемая на боковину рамы тележки через опоры кузова, определяется по формуле

$$P_2 = \frac{9,8M_{\kappa}}{2n_m}, \quad (3.2)$$

где  $n_m$  – количество тележек электровоза;  $M_{\kappa}$  – масса кузова, т.

Нагрузка  $P_3$  складывается из нагрузки от собственной массы средней поперечной балки и нагрузки от подрессоренной массы ТЭД и определяется как

$$P_3 = 9,8(M_{\text{снб}} + M_{\text{тэд}}), \quad (3.3)$$

где  $M_{\text{снб}}$  – масса средней поперечной балки;  $M_{\text{тэд}}$  – масса тягового двигателя.

Нагрузка  $P_4$  в силу симметрии конструкции рамы тележки относительно оси средней поперечной балки численно равна нагрузке  $P_1$ .

Так как колесные пары являются подвижными опорами тележки, то в точке крепления системы буксового рессорного подвешивания к раме передаются реакции опор, равные

$$R_I = \frac{2P_1 + 2P_2 + P_3 + 2P_4}{8}. \quad (3.4)$$

При опорно-рамном подвешивании ТЭД полностью подрессорены и жестко закреплены на раме тележки. Поэтому расчетная схема рамы имеет аналогичный вид, что и для опорно-осевого подвешивания ТЭД, но с добавлением силы  $P_5$ , которая действует на концевую поперечную балку от второй опоры ТЭД (рис. 3.2).

Нагрузки  $P_1$ – $P_4$  (рис. 3.1) определяются аналогично, как и для опорно-осевого подвешивания [формулы (3.1)–(3.3)].

Нагрузка  $P_5$  определяется по формуле

$$P_5 = \frac{9,8M_{\text{тэд}}}{2}. \quad (3.5)$$

Реакции опор при опорно-рамном подвешивании ТЭД определяются как

$$R_{II} = R_I + \frac{2P_5}{8}. \quad (3.6)$$



Расчетные точки для определения изгибающих и крутящих моментов в элементах рамы тележки и номера сечений для расчета напряжений от приложенной нагрузки назначаются в соответствии с общепринятыми правилами [7]:

- 1 – середина передней концевой поперечной балки;
- 2 – конец передней концевой поперечной балки;
- 3 – конец боковины;
- 4 – кронштейн крепления буксового подвешивания к раме тележки;
- 5 – середина переходной части боковины;
- 6 – кронштейн крепления буксового подвешивания к раме тележки;
- 7 – середина боковины;
- 8 – середина боковины;
- 9 – кронштейн крепления буксового подвешивания к раме тележки;
- 10 – середина переходной части боковины;
- 11 – кронштейн крепления буксового подвешивания к раме тележки;
- 12 – конец боковины;
- 13 – конец задней концевой поперечной балки;
- 14 – середина задней концевой поперечной балки;
- 15 – конец средней поперечной балки;
- 16 – середина средней поперечной балки (жесткая заделка).

Расстояния между расчетными точками для схемы рис. 3.1 определяются по следующим формулам:

$$\ell_1 = b_m/2; \quad (3.7)$$

$$\ell_5 = \ell_m/2 - B_1/2; \quad (3.8)$$

$$\ell_3 = \ell_{кчб} - B_1/2 + \ell_{нчб}/2; \quad (3.9)$$

$$\ell_4 = \ell_5 - 2a_m/2 + L/2; \quad (3.10)$$

$$\ell_2 = \ell_5 - 2a_m/2 - L/2. \quad (3.11)$$

Расстояния  $\ell_1 - \ell_5$  между расчетными точками для схемы рис. 3.2 определяются по формулам (3.7)–(3.11), а расстояние  $\ell_6$  (расчетная длина кронштейна подвешивания тягового электродвигателя) – по формуле

$$\ell_6 = \ell_5 - (\ell_{нод} + \Delta + B_2/2). \quad (3.12)$$

Длину рессоры  $L$  грузового электровоза принять в интервале от 1÷1,4 м, для пассажирского электровоза равным 0,65÷0,75 м.

### 3.2. Построение единичных эпюр изгибающих и крутящих моментов

Согласно методу сил, на данном этапе расчета неизвестные моменты  $X_1$  и  $X_2$  необходимо приравнять единице, т. е.  $X_1 = X_2 = 1$  кН·м. После этого расчетная схема рамы тележки **последовательно** нагружается единичными моментами  $X_1$  и  $X_2$ , а **остальные силы** (внешняя нагрузка) **условно отбрасываются**. В этом случае расчетные схемы рамы тележки грузового и пассажирского электровазов одинаковы, следовательно, **методика расчета и построения единичных эпюр не зависит от рода службы электровоза**.

При расчете и построении эпюр изгибающих и крутящих моментов принято следующее правило знаков [9]:

- **за положительный изгибающий момент считается момент, растягивающий в вертикальной плоскости нижние волокна;**
- **за положительное направление крутящего момента принимается момент, направленный по часовой стрелке.**

Эпюра изгибающих моментов строится со стороны растянутого волокна.

При нагружении расчетной схемы рамы тележки единичным моментом  $X_1$  деформацию изгиба испытывают передняя концевая поперечная балка (участок 1–2) и средняя поперечная балка (участок 15–16), а деформацию кручения – левая часть боковины (участок 3–7).

Изгибающие моменты в этом случае определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} M_{u1}^{(1)} &= 1 \text{ кН} \cdot \text{м}; & M_{u2}^{(1)} &= 1 \text{ кН} \cdot \text{м}; \\ M_{u15}^{(1)} &= -1 \text{ кН} \cdot \text{м}; & M_{u16}^{(1)} &= -1 \text{ кН} \cdot \text{м}. \end{aligned}$$

Крутящий момент на боковине  $M_{\kappa 3-7}^{(1)} = 1$  кН·м.

При нагружении расчетной схемы рамы тележки единичным моментом  $X_2$  деформацию изгиба испытывают задняя концевая поперечная балка (участок 13–14) и средняя поперечная балка (участок 15–16), а деформацию кручения – правая часть боковины (участок 8–12).

В этом случае изгибающие и крутящий моменты определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} M_{u13}^{(2)} &= 1 \text{ кН} \cdot \text{м}; & M_{u14}^{(2)} &= 1 \text{ кН} \cdot \text{м}; & M_{u15}^{(2)} &= -1 \text{ кН} \cdot \text{м}; \\ M_{u16}^{(2)} &= -1 \text{ кН} \cdot \text{м}; & M_{\kappa 8-12}^{(2)} &= -1 \text{ кН} \cdot \text{м}. \end{aligned}$$

Построенные единичные эпюры изгибающих и крутящих моментов представлены на рис. 3.3 и 3.4 соответственно.

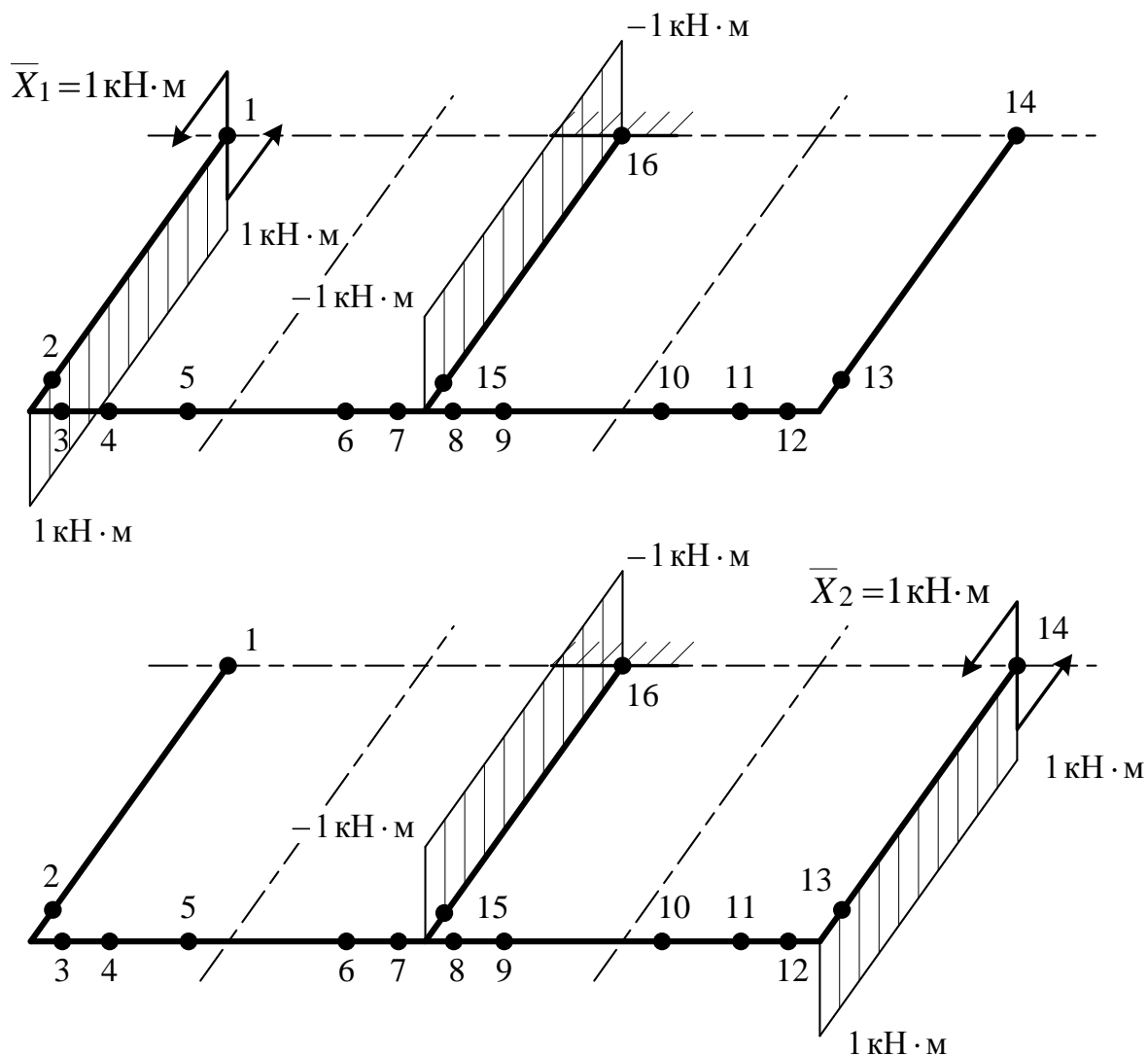


Рис. 3.3. Единичные эпюры изгибающих моментов от  $X_1$  и  $X_2$

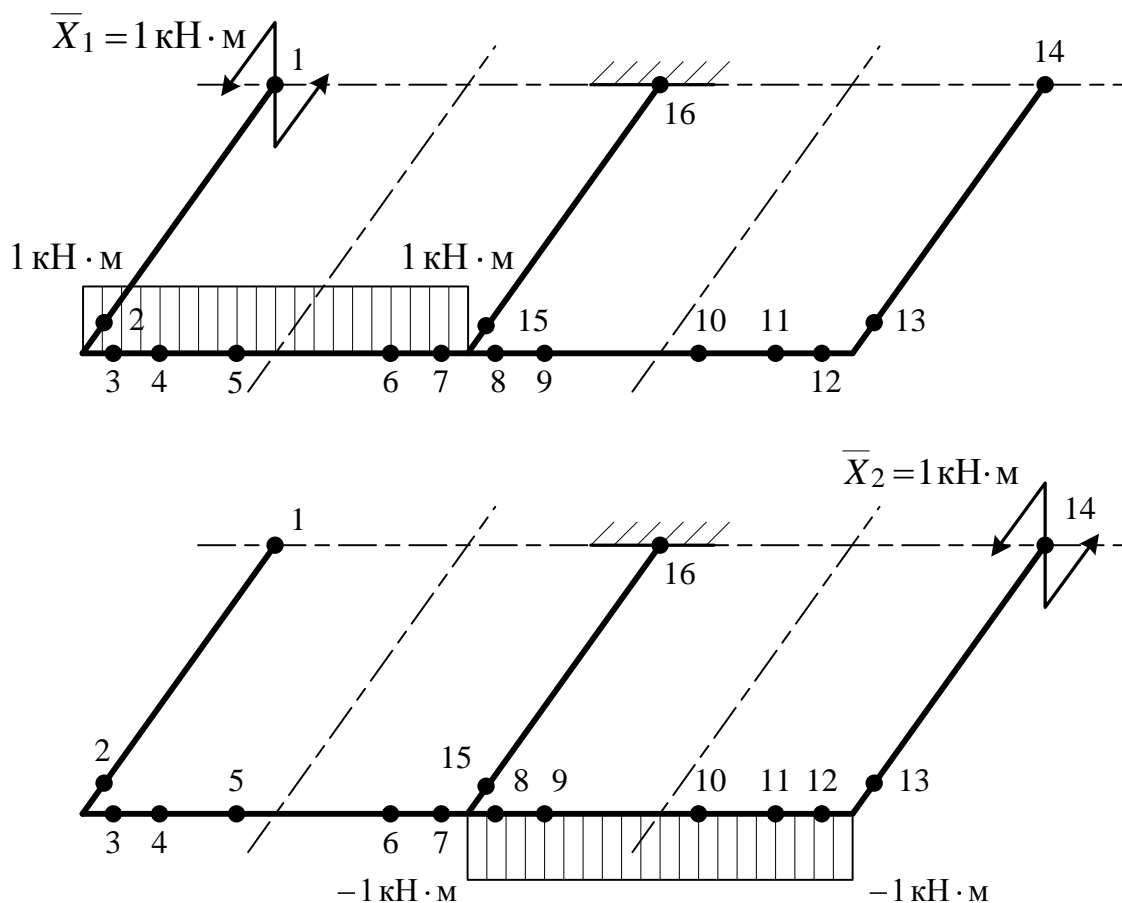


Рис. 3.4. Единичные эпюры крутящих моментов от  $X_1$  и  $X_2$

### 3.3. Расчет и построение эпюры изгибающих моментов от внешней нагрузки для грузового электровоза

Внешняя нагрузка для расчетной схемы рис. 3.1 представлена сосредоточенными силами, приложенными по осевой линии боковины, симметричными относительно средней поперечной балки, которые вызывают только деформацию изгиба. Для расчета эпюры изгибающих моментов расчетная схема рис. 3.1 нагружается только **внешней нагрузкой**, а моменты  $X_1$  и  $X_2$  **условно отбрасываются**. Изгибающие моменты в расчетных точках рамы тележки определяются следующим образом:

$$M_{u4} = -P_1 \ell_2; \quad (3.13)$$

$$M_{u5} = -P_1 \ell_3 + R_I (\ell_3 - \ell_2); \quad (3.14)$$

$$M_{u6} = -P_1 \ell_4 + R_I (\ell_4 - \ell_2); \quad (3.15)$$

$$M_{u7} = -P_1 \ell_5 + R_I (\ell_5 - \ell_2) + R_I (\ell_5 - \ell_4); \quad (3.16)$$

$$M_{u8} = -P_4 \ell_5 + R_I (\ell_5 - \ell_2) + R_I (\ell_5 - \ell_4); \quad (3.17)$$

$$M_{u9} = -P_4 \ell_4 + R_I (\ell_4 - \ell_2); \quad (3.18)$$

$$M_{u10} = -P_4 \ell_3 + R_I (\ell_3 - \ell_2); \quad (3.19)$$

$$M_{u11} = -P_4 \ell_2; \quad (3.20)$$

$$M_{u16} = (4 R_I - P_1 - P_2 - P_4) \ell_1. \quad (3.21)$$

Во всех остальных расчетных точках (1, 2, 3, 12, 13, 14, 15) изгибающие моменты равны нулю.

Так как численные значения изгибающих моментов в различных точках могут существенно различаться, то допускается построение эпюры в искаженном масштабе или с разрывом. При этом на эпюре должны быть указаны численные значения моментов в расчетных точках.

Вид эпюры изгибающих моментов представлен на рис. 3.5.

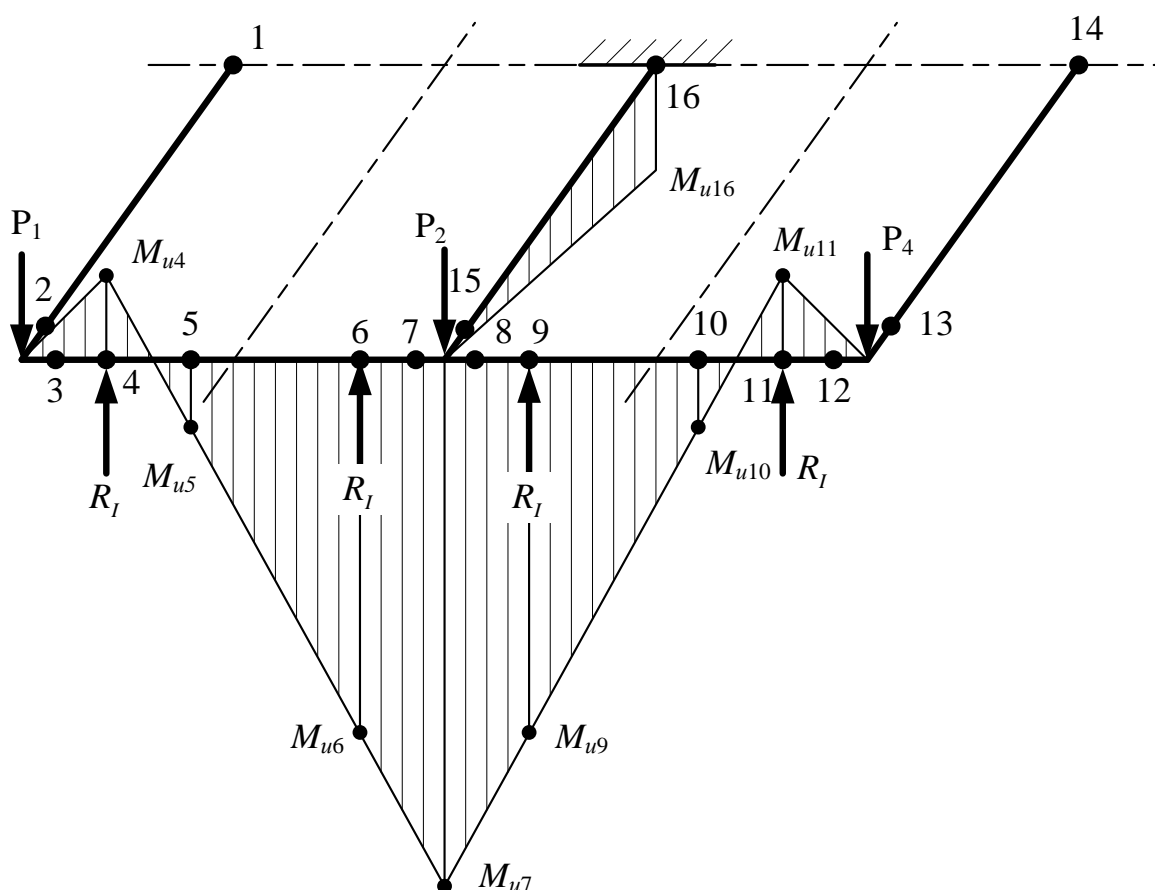


Рис. 3.5. Эпюра изгибающих моментов от внешней нагрузки для грузового электровоза

### 3.4. Расчет и построение эпюр изгибающих и крутящих моментов от внешней нагрузки для пассажирского электровоза

Внешняя нагрузка для схемы рис. 3.2 представлена не только сосредоточенными силами, приложенными по осевой линии боковины, и симметричными относительно средней поперечной балки, но и сосредоточенными силами, приложенными к концевым поперечным балкам со смещением относительно их осевых линий. В результате внешняя нагрузка для рассматриваемой расчетной схемы вызывает деформации изгиба и кручения.

Для расчета эпюр изгибающих и крутящих моментов расчетная схема рис. 3.2 нагружается **только внешней нагрузкой**, а моменты  $X_1$  и  $X_2$  **условно отбрасываются**.

Изгибающие моменты в расчетных точках рамы тележки в предположении, что  $\ell_3 > \ell_6 > \ell_2$ , определяются следующими выражениями:

$$M_{u2} = -P_5 \ell_1/2; \quad (3.22)$$

$$M_{u3} = P_5 \ell_6/2; \quad (3.23)$$

$$M_{u4} = P_5 \ell_6/2 - P_1 \ell_2; \quad (3.24)$$

$$M_{u5} = P_5 \ell_6/2 - P_1 \ell_3 + R_{II} (\ell_3 - \ell_2) - P_5 (\ell_3 - \ell_6)/2; \quad (3.25)$$

$$M_{u6} = P_5 \ell_6/2 - P_1 \ell_4 + R_{II} (\ell_4 - \ell_2) - P_5 (\ell_4 - \ell_6)/2; \quad (3.26)$$

$$M_{u7} = P_5 \ell_6/2 - P_1 \ell_5 + R_{II} (\ell_5 - \ell_2) - P_5 (\ell_5 - \ell_6)/2 + R_{II} (\ell_5 - \ell_4); \quad (3.27)$$

$$M_{u8} = P_5 \ell_6/2 - P_4 \ell_5 + R_{II} (\ell_5 - \ell_2) - P_5 (\ell_5 - \ell_6)/2 + R_{II} (\ell_5 - \ell_4); \quad (3.28)$$

$$M_{u9} = P_5 \ell_6/2 - P_4 \ell_4 + R_{II} (\ell_4 - \ell_2) - P_5 (\ell_4 - \ell_6)/2; \quad (3.29)$$

$$M_{u10} = P_5 \ell_6/2 - P_4 \ell_3 + R_{II} (\ell_3 - \ell_2) - P_5 (\ell_3 - \ell_6)/2; \quad (3.30)$$

$$M_{u11} = P_5 \ell_6/2 - P_4 \ell_2; \quad (3.31)$$

$$M_{u12} = P_5 \ell_6/2; \quad (3.32)$$

$$M_{u13} = -P_5 \ell_1/2; \quad (3.33)$$

$$M_{u16} = (4 R_{II} - P_1 - P_2 - P_4) \ell_1; \quad (3.34)$$

Во всех остальных расчетных точках (1, 14, 15) изгибающие моменты равны нулю. При соблюдении условия  $\ell_3 > \ell_6 > \ell_2$ , в соответствии с правилом параллельного переноса линии действия сил, силы  $P_5/2$  про-

ектируются на боковину между точками 4 и 5, 10 и 11. Если **указанное условие не выполняется**, то проекции сил  $P_5/2$  на боковину будут расположены **между другими точками**. В этом случае **необходимо откорректировать** соответствующим образом формулы (3.22)–(3.33).

Вид эпюры изгибающих моментов от внешней нагрузки представлен на рис. 3.6.

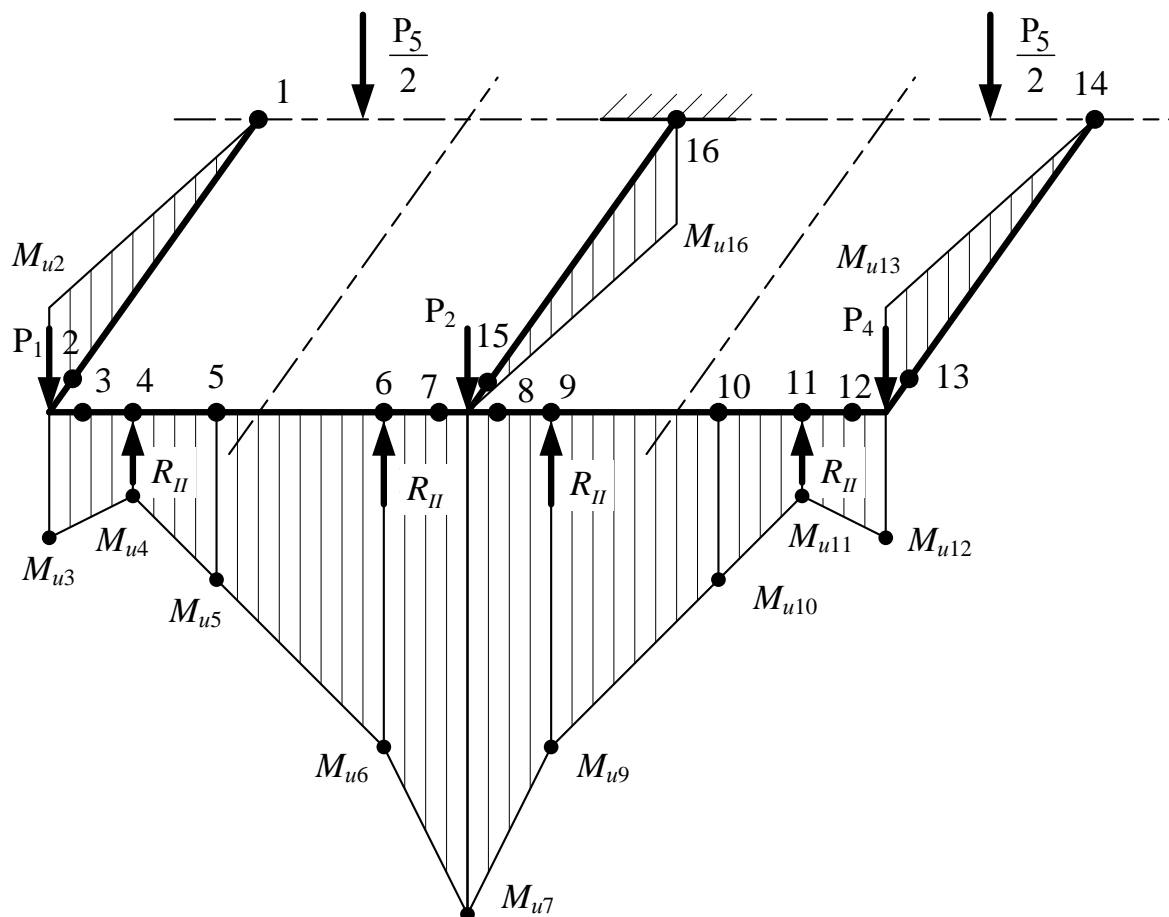


Рис. 3.6. Эпюра изгибающих моментов от внешней нагрузки для пассажирского электровоза

Крутящие моменты для участков расчетной схемы рамы тележки определяются следующим образом:

$$M_{\kappa 1-2} = -P_5 \ell_6 / 2; \quad (3.35)$$

$$M_{\kappa 3-7} = -P_5 \ell_1 / 2; \quad (3.36)$$

$$M_{\kappa 8-12} = P_5 \ell_1 / 2; \quad (3.37)$$

$$M_{\kappa 13-14} = P_5 \ell_6 / 2. \quad (3.38)$$

Для средней поперечной балки (участок 15–16) крутящий момент равен нулю, так как все внешние силы симметричны относительно этой балки как по расположению, так и по величине.

Вид эпюры крутящих моментов от внешней нагрузки представлен на рис 3.7.

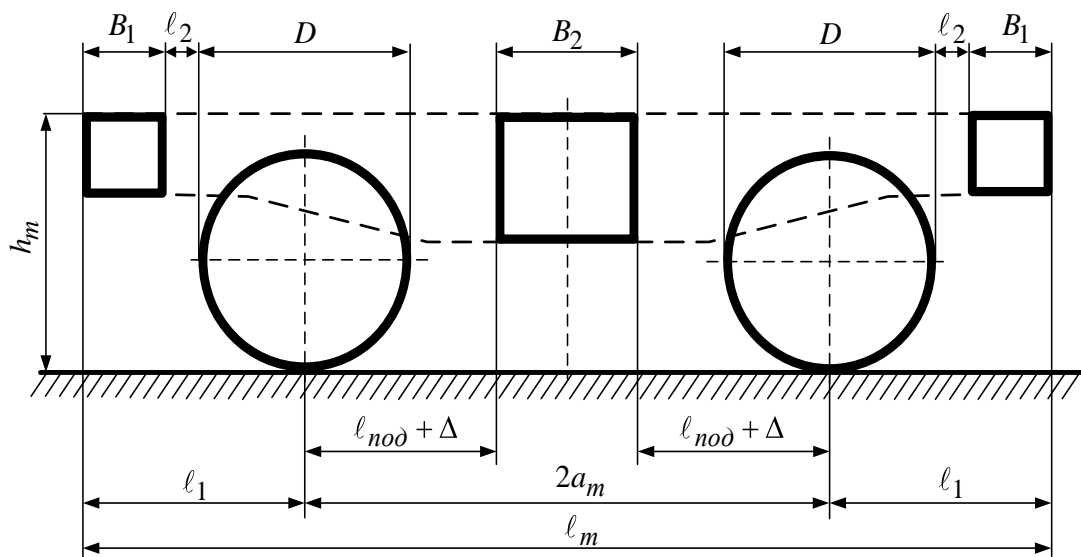


Рис. 3.7. Эпюра крутящих моментов от внешней нагрузки для пассажирского электровоза

### 3.5. Расчет единичных и грузовых перемещений, определение численных значений моментов $X_1$ и $X_2$

На этом этапе расчета рамы тележки методом сил необходимо определить перемещения, вызванные действием единичных моментов  $X_1$  и  $X_2$ . Эти перемещения называются **единичными** и обозначаются в общем виде через  $\delta_{ij}$ , где  $i$  показывает направление перемещения, а  $j$  – номер силового фактора, вызывающего перемещение. Для определения единичных перемещений используется формула Мора–Максвелла [7, 9], которая применительно к рассматриваемому случаю расчета рамы тележки на статическую вертикальную нагрузку имеет вид:

$$\delta_{i,j} = \sum \int_0^1 \frac{M_{ui} M_{uj}}{E I_z} d\ell + \sum \int_0^1 \frac{M_{\kappa i} M_{\kappa j}}{G I_{\kappa}} d\ell, \quad (3.39)$$


где  $M_{ui}$ ,  $M_{uj}$  – функции единичных эпюр изгибающих моментов от  $i$ -го и  $j$ -го единичных неизвестных соответственно;  $M_{\kappa i}$ ,  $M_{\kappa j}$  – функции единичных эпюр крутящих моментов от  $i$ -го и  $j$ -го единичных неизвестных соответственно;  $\ell$  – длина участка конструкции с постоянной жестко-




стью (постоянным сечением);  $E$  – модуль упругости первого рода;  $G$  – модуль сдвига (модуль упругости второго рода);  $I_z$ ,  $I_k$  – моменты инерции сечений при изгибе и кручении соответственно;  $E I_z$ ,  $G I_k$  – жесткости элементов конструкции при изгибе и кручении соответственно.

Для упрощения расчетов по формуле (3.39) используется **теорема Верещагина**, которая позволяет получить из указанной формулы следующее выражение:

$$\delta_{i,j} = \sum \frac{S_{ui} h_{uj}}{E I_z} + \sum \frac{S_{ki} h_{kj}}{G I_k}, \quad (3.40)$$

где ,  $S_{ki}$  – площади единичных эпюр изгибающих и крутящих моментов от  $i$ -го неизвестного;  $h_{uj}$ ,  $h_{kj}$  – ординаты единичных эпюр изгибающих и крутящих моментов от  $j$ -го неизвестного, взятые под центром тяжести соответствующих эпюр от  $i$ -го неизвестного.

Для расчетных схем рамы тележки (рис. 3.1 и 3.2), **количество возможных единичных перемещений** определяется в зависимости от **количества неизвестных моментов**. Так как количество неизвестных моментов равно 2 ( $X_1$  и  $X_2$ ), то количество возможных единичных перемещений будет равно  $2^2$ , т. е. 4, а их обозначения будут иметь следующий вид:  $\delta_{1,1}$ ,  $\delta_{1,2}$ ,  $\delta_{2,1}$ ,  $\delta_{2,2}$ . При этом, согласно свойству взаимности перемещений,  $\delta_{1,2} = \delta_{2,1}$ .

Рассмотрим процесс составления расчетной формулы по теореме Верещагина на примере единичного перемещения . Для вычисления этого перемещения необходимо произвести перемножение площадей единичных эпюр изгибающих моментов от  $X_1$  на отдельных участках расчетной схемы рамы тележки на ординаты единичных эпюр изгибающих моментов от  $X_1$ , взятые под центрами тяжести указанных площадей на отдельных участках. Аналогичную операцию необходимо произвести и с единичными эпюрами крутящих моментов от  $X_1$  и результаты этих перемножений суммировать согласно формуле (3.40). В конечном итоге получаем следующее выражение:

$$\delta_{1,1} = \frac{[M_{u1}^{(1)}]^2 \ell_1}{E I_{zkn\bar{o}}} + \frac{[M_{k3-7}^{(1)}]^2 \ell_3}{G I_{kk\bar{ч}\bar{o}}} + \frac{[M_{k3-7}^{(1)}]^2 (\ell_5 - \ell_3)}{G I_{kc\bar{ч}\bar{o}}} + \frac{[M_{u15}^{(1)}]^2 \ell_1}{E I_{zcn\bar{o}}}, \quad (3.41)$$

где  $I_{zkn\bar{o}}$ ,  $I_{zcn\bar{o}}$  – моменты инерции при изгибе относительно оси  $Z$  для концевой поперечной балки и средней поперечной балки рамы тележки соответственно;  $I_{kk\bar{ч}\bar{o}}$ ,  $I_{kc\bar{ч}\bar{o}}$  – моменты инерции при кручении для кон-

цевой части боковины и средней части боковины соответственно. Моменты инерции при изгибе и кручении для указанных балок определяются по табл. 2.4.

Аналогичным образом можно получить формулы для расчета единичных перемещений  $\delta_{1,2}(\delta_{2,1})$  и  $\delta_{2,2}$ , перемножая в первом случае единичные эпюры от  $X_1$  на единичные эпюры от  $X_2$ , а во втором случае – единичные эпюры от  $X_2$  на единичные эпюры от  $X_2$ :

$$\delta_{1,2} = \delta_{2,1} = \frac{M_{u15}^{(1)} M_{u15}^{(2)} \ell_1}{E I_{zcnб}}; \quad (3.42)$$

$$\delta_{2,2} = \frac{[M_{u13}^{(2)}]^2 \ell_1}{E I_{zknб}} + \frac{[M_{к8-12}^{(2)}]^2 \ell_3}{G I_{ккчб}} + \frac{[M_{к8-12}^{(2)}]^2 (\ell_5 - \ell_3)}{G I_{ксчб}} + \frac{[M_{u15}^{(2)}]^2 \ell_1}{E I_{zcnб}}. \quad (3.43)$$

В формулах (3.41)–(3.43) численные значения расстояний подставляются в метрах (м), изгибающих и крутящих моментов – в килоньютонах на метр (кН·м), моментов инерции при изгибе и кручении – в метрах в 4-й степени (м<sup>4</sup>), модулей упругости  $E$  и  $G$  – в килопаскалях (кПа):

$E = 2,06 \cdot 10^8$  кПа;  $G = 8 \cdot 10^7$  кПа.

**Грузовые перемещения** (перемещения, вызванные внешней нагрузкой), также как и единичные, рассчитываются по формуле Мора–Максвелла, которая применительно к рассматриваемому расчету имеет вид:

$$\Delta_{i,p} = \sum \int_0^1 \frac{M_{ui} M_{up}}{E I_z} d\ell + \sum \int_0^1 \frac{M_{ki} M_{kp}}{G I_k} d\ell, \quad (3.44)$$

или, использованием теоремы Верещагина,

$$\Delta_{i,p} = \sum \frac{S_{ui} h_{up}}{E I_z} + \sum \frac{S_{ki} h_{kp}}{G I_k}, \quad (3.45)$$

где  $M_{up}$ ,  $M_{kp}$  – функции эпюр изгибающих и крутящих моментов от внешней нагрузки;  $h_{up}$ ,  $h_{kp}$  – ординаты эпюр изгибающих и крутящих моментов от внешней нагрузки, взятые под центром тяжести соответствующих эпюр от  $i$ -го неизвестного.

Если расчет **единичных перемещений** для **грузового** и **пассажирского** электровозов **производится по одним и тем же формулам** (3.41)–(3.43), так как **единичные эпюры** (см. рис. 3.3 и 3.4) для указанных электровозов **одинаковы**, то **формулы для расчета грузовых переме-**

*щений* для этих электровозов будут **различными**. Это обусловлено **различием в эпюрах изгибающих и крутящих моментов от внешней нагрузки** (см. рис. 3.5–3.7) грузового и пассажирского электровозов.

**Для грузового электровоза** в результате перемножения единичных эпюр от  $X_1$  на эпюру изгибающих моментов от внешней нагрузки по теореме Верещагина формула (3.39) принимает вид:

$$\Delta_{1,p} = \frac{M_{u15}^{(1)} M_{u16} \ell_1}{2 E I_{zcn\delta}}, \quad (3.46)$$

а в результате перемножения единичных эпюр от  $X_2$  на эпюру изгибающих моментов от внешней нагрузки –

$$\Delta_{2,p} = \frac{M_{u15}^{(2)} M_{u16} \ell_1}{2 E I_{zcn\delta}}. \quad (3.47)$$

**Для пассажирского электровоза** в результате перемножения единичных эпюр от  $X_1$  на эпюры изгибающих моментов и крутящих моментов от внешней нагрузки по теореме Верещагина формула (3.45) принимает вид:

$$\begin{aligned} \Delta_{1,p} = & \frac{M_{u1}^{(1)} M_{u2} \ell_1}{2 E I_{zkn\delta}} + \frac{M_{\kappa3-7}^{(1)} M_{\kappa3-7} \ell_3}{G I_{\kappa\kappa\delta}} + \\ & + \frac{M_{\kappa3-7}^{(1)} M_{\kappa3-7} (\ell_5 - \ell_3)}{G I_{\kappa\delta\delta}} + \frac{M_{u15}^{(1)} M_{u16} \ell_1}{2 E I_{zcn\delta}}, \end{aligned} \quad (3.48)$$

а в результате перемножения единичных эпюр от  $X_2$  на эпюры изгибающих и крутящих моментов от внешней нагрузки –

$$\begin{aligned} \Delta_{2,p} = & \frac{M_{u13}^{(2)} M_{u13} \ell_1}{2 E I_{zkn\delta}} + \frac{M_{\kappa8-12}^{(2)} M_{\kappa8-12} \ell_3}{G I_{\kappa\kappa\delta}} + \\ & + \frac{M_{\kappa8-12}^{(2)} M_{\kappa8-12} (\ell_5 - \ell_3)}{G I_{\kappa\delta\delta}} + \frac{M_{u15}^{(2)} M_{u16} \ell_1}{2 E I_{zcn\delta}}. \end{aligned} \quad (3.49)$$

После расчета единичных и грузовых перемещений необходимо составить систему канонических уравнений метода сил для расчетной схемы рамы тележки при статической вертикальной нагрузке, имеющую следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \delta_{1,1} X_1 + \delta_{1,2} X_2 + \Delta_{1,p} &= 0 \\ \delta_{2,1} X_1 + \delta_{2,2} X_2 + \Delta_{2,p} &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (3.50)$$

Решение системы (3.50) позволяет определить истинные значения неизвестных моментов  $X_1$  и  $X_2$ . Следует отметить, что **численные значения моментов**  $X_1$  и  $X_2$  должны быть **одинаковы**, так как расчетные схемы рам тележек (см. рис. 3.1 и 3.2) **симметричны** относительно средней поперечной балки как в отношении конструкции, так и в отношении действующих нагрузок.

После определения истинных значений неизвестных моментов  $X_1$  и  $X_2$  необходимо рассчитать и построить эпюры изгибающих и крутящих моментов от этих силовых воздействий. Для построения эпюры изгибающих моментов необходимо **графически суммировать единичные эпюры изгибающих моментов** от  $X_1$  и  $X_2$  (см. рис. 3.3), а затем полученные **ординаты результирующей эпюры умножить на соответствующее численное значение**  $X_1$  или  $X_2$ . По завершению этой операции получаем следующие значения результирующих изгибающих моментов:

$$M'_{u1} = X_1 M_{u1}^{(1)}; \quad (3.51)$$

$$M'_{u2} = X_1 M_{u2}^{(1)}; \quad (3.52)$$

$$M'_{u13} = X_2 M_{u13}^{(2)}; \quad (3.53)$$

$$M'_{u14} = X_2 M_{u14}^{(2)}; \quad (3.54)$$

$$M'_{u15} = X_1 M_{u15}^{(1)} + X_2 M_{u15}^{(2)}; \quad (3.55)$$

$$M'_{u16} = X_1 M_{u16}^{(1)} + X_2 M_{u16}^{(2)}. \quad (3.56)$$

По результатам расчетов строится результирующая эпюра изгибающих моментов от  $X_1$  и  $X_2$  (рис. 3.8).

Для построения эпюры крутящих моментов необходимо **графически суммировать единичные эпюры крутящих моментов** от  $X_1$  и  $X_2$  (рис. 3.4), а затем полученные **ординаты результирующей эпюры умножить на соответствующее численное значение**  $X_1$  или  $X_2$ . По завершении этой операции получаем следующие значения результирующих крутящих моментов:

$$M'_{\kappa 3-7} = X_1 M_{\kappa 3-7}^{(1)}; \quad (3.57)$$

$$M'_{\kappa 8-12} = X_2 M_{\kappa 8-12}^{(2)}. \quad (3.58)$$

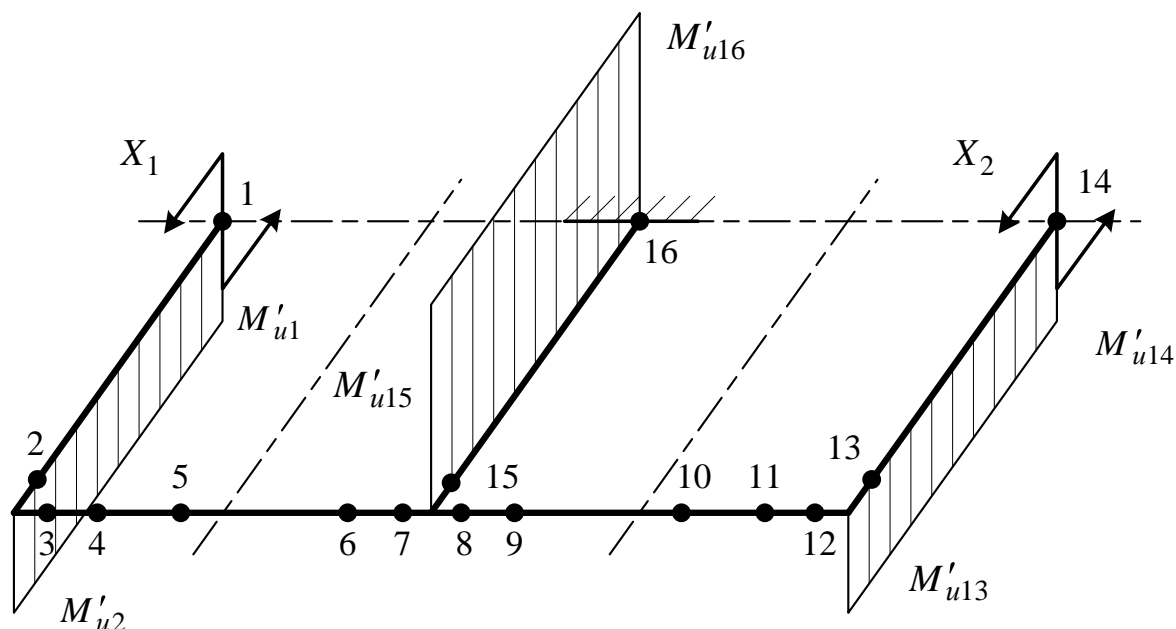


Рис. 3.8. Результирующая эпюра изгибающих моментов от  $X_1$  и  $X_2$

По итогам расчетов строится результирующая эпюра крутящих моментов от  $X_1$  и  $X_2$  (рис. 3.9).

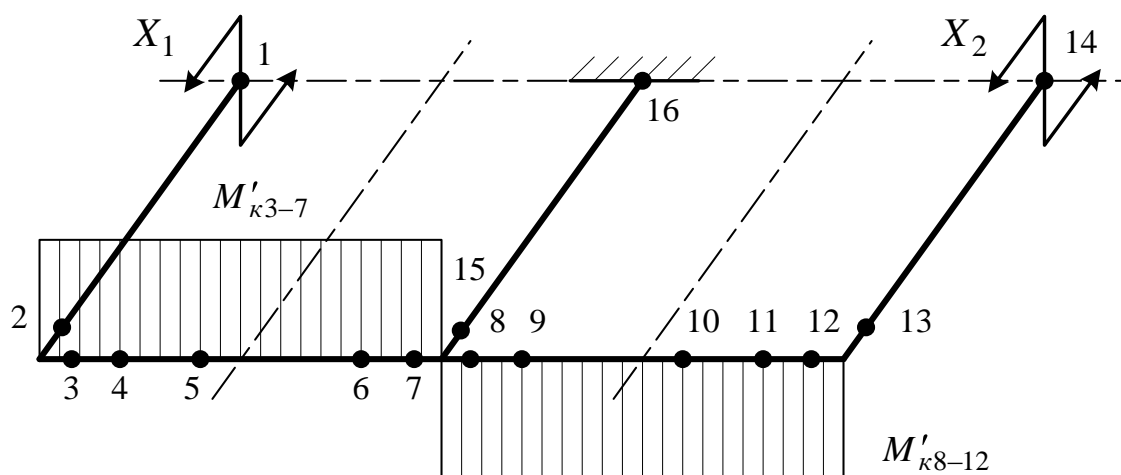


Рис. 3.9. Результирующая эпюра крутящих моментов от  $X_1$  и  $X_2$

При построении результирующих эпюр изгибающих и крутящих моментов от истинных значений  $X_1$  и  $X_2$  следует обращать внимание на тот факт, что при решении системы (3.50) неизвестные моменты могут иметь отрицательное значение. В этом случае необходимо внести кор-

ректировку в соответствующие эпюры изгибающих и крутящих моментов. Например, если  $X_1$  и  $X_2$  имеют отрицательное значение, то на концевых поперечных балках в расчетной схеме рамы тележки на рис. 3.8 эпюра изгибающих моментов должна быть построена со стороны верхних (растянутых) волокон, а на средней поперечной балке – со стороны нижних волокон. Эпюра крутящих моментов для левой части боковины на рис. 3.9 должна быть отложена вниз, а для правой части боковины – вверх. При этом направление векторов  $X_1$  и  $X_2$  для рис. 3.8 и рис. 3.9 изменяется на противоположное.

### 3.6. Расчет и построение суммарных эпюр для грузового электровоза

Суммарная эпюра изгибающих моментов для рамы тележки грузового электровоза рассчитывается путем графического суммирования эпюры изгибающих моментов от внешней нагрузки (см. рис. 3.5) с результирующей эпюрой изгибающих моментов от  $X_1$  и  $X_2$  (рис. 3.8). Из сопоставления указанных эпюр видно, что суммированию подлежат только эпюры на концевых поперечных балках и на средней поперечной балке, а для боковины суммарные изгибающие моменты в точках 3–12 численно равны изгибающим моментам в этих точках, вызванным внешней нагрузкой и ранее рассчитанным по формулам (3.13) – (3.20). Суммарные изгибающие моменты для расчетных точек на концевых и средней поперечных балках рассчитываются по формулам:

$$M_{u1}^c = M'_{u1}; \quad (3.59)$$

$$M_{u2}^c = M'_{u2}; \quad (3.60)$$

$$M_{u13}^c = M'_{u13}; \quad (3.61)$$

$$M_{u14}^c = M'_{u14}; \quad (3.62)$$

$$M_{u15}^c = M'_{u15}; \quad (3.63)$$

$$M_{u16}^c = M'_{u16} + M_{u16}. \quad (3.64)$$

Примерный вид суммарной эпюры изгибающих моментов для рамы тележки грузового электровоза показан на рис. 3.10.

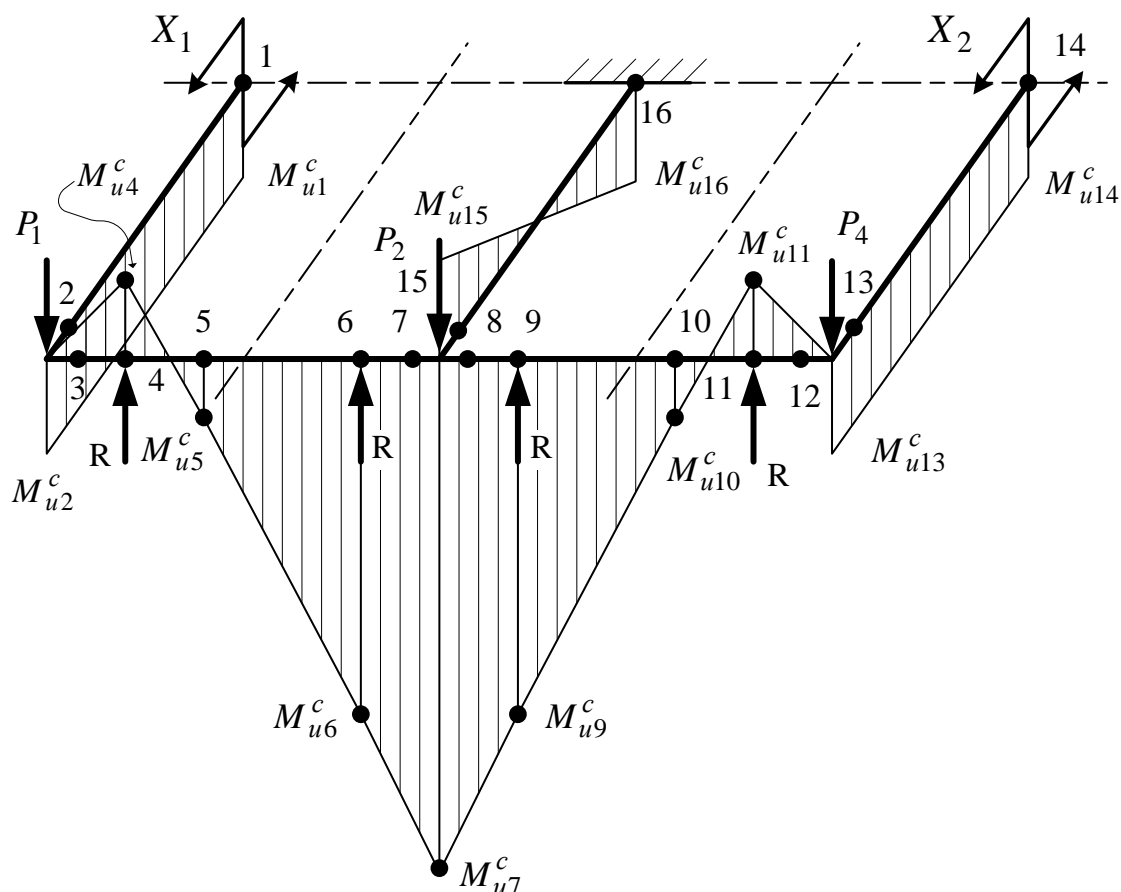


Рис. 3.10. Суммарная эпюра изгибающих моментов для грузового электровоза

Так как **внешняя нагрузка** в раме тележки грузового электровоза **не вызывает деформации кручения**, то суммарная эпюра крутящих моментов аналогична результирующей эпюре крутящих моментов от  $X_1$  и  $X_2$  (рис. 3.9).

### 3.7. Расчет и построение суммарных эпюр для пассажирского электровоза

Суммарная эпюра изгибающих моментов для рамы тележки пассажирского электровоза рассчитывается путем графического суммирования эпюры изгибающих моментов от внешней нагрузки (см. рис. 3.6) с результирующей эпюрой изгибающих моментов от  $X_1$  и  $X_2$  (см. рис. 3.8).

Из сопоставления указанных эпюр видно, что суммированию подлежат только эпюры на концевых поперечных балках и на средней поперечной балке, а для боковины суммарные изгибающие моменты в точках 3–12 численно равны изгибающим моментам в этих точках, вызванным внешней нагрузкой и ранее рассчитанным по формулам (3.22)–(3.34).

Суммарные изгибающие моменты для расчетных точек 1 и 14 на концевых поперечных балках и для расчетной точки 15 на средней поперечной балке рассчитываются по формулам (3.59), (3.62) и (3.63) соответственно.

Суммарные изгибающие моменты для расчетных точек 2 и 13 на концевых поперечных балках и для точки 16 на средней поперечной балке определяются по следующим формулам:

$$M_{u2}^c = M'_{u2} + M_{u2}; \quad (3.65)$$

$$M_{u13}^c = M'_{u13} + M_{u13}; \quad (3.66)$$

$$M_{u16}^c = M'_{u16} + M_{u16}. \quad (3.67)$$

Примерный вид суммарной эпюры изгибающих моментов для рамы тележки пассажирского электровоза показан на рис. 3.11.

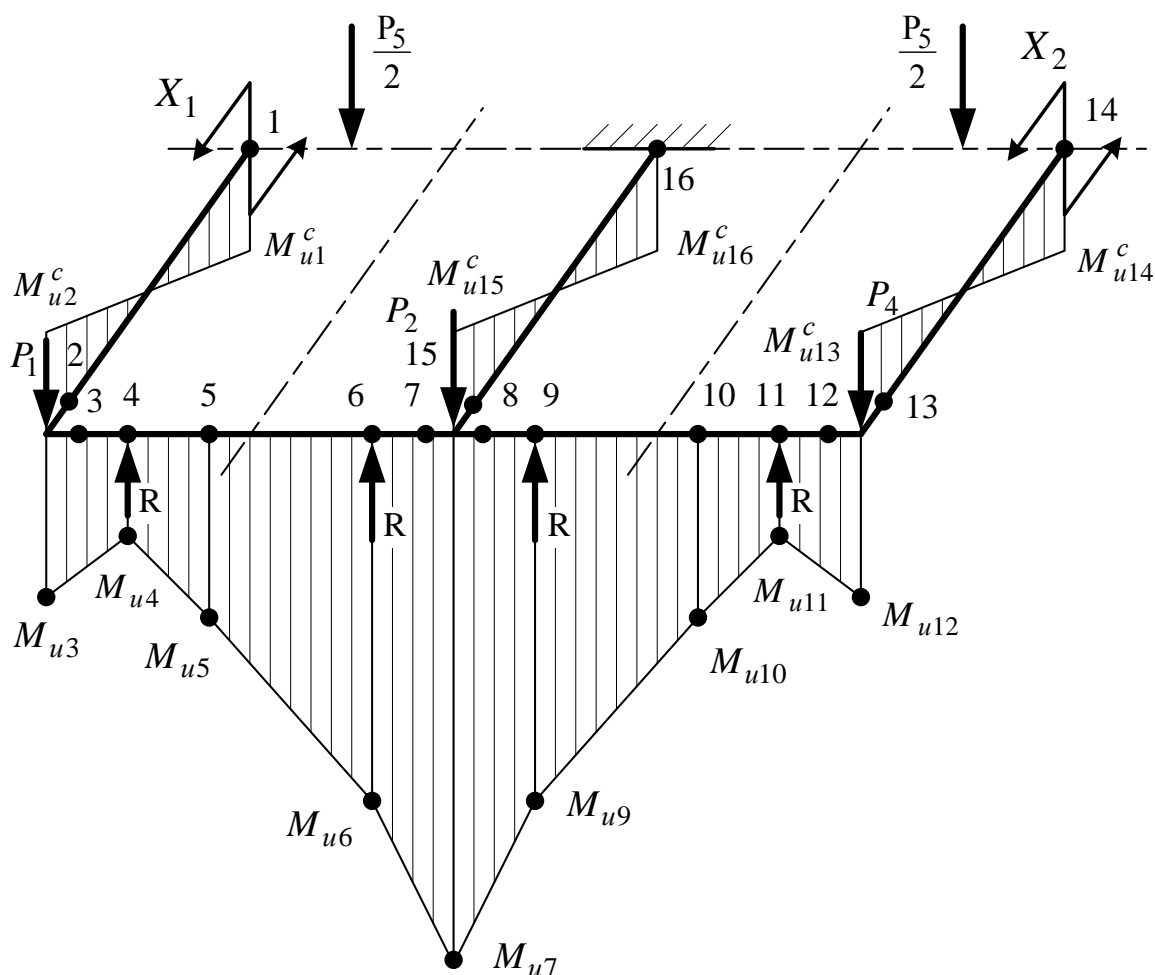


Рис. 3.11. Суммарная эпюра изгибающих моментов для пассажирского электровоза



Суммарная эпюра крутящих моментов для рамы тележки пассажирского электровоза рассчитывается путем графического суммирования эпюры крутящих моментов от внешней нагрузки (рис. 3.7) с результирующей эпюрой крутящих моментов от  $X_1$  и  $X_2$  (рис. 3.9).

Из сопоставления указанных эпюр видно, что суммированию подлежат только эпюры на боковине, а для концевых поперечных балок суммарные крутящие моменты на участках 1–2 и 13–14 численно равны крутящим моментам на этих участках, вызванным внешней нагрузкой и ранее рассчитанным по формулам (3.35) и (3.38).

Суммарные крутящие моменты для участков 3–7 и 8–12 на боковине рамы тележки определяются по следующим формулам:

$$M_{к3-7}^c = M'_{к3-7} + M_{к3-7}; \quad (3.68)$$

$$M_{к8-12}^c = M'_{к8-12} + M_{к8-12}. \quad (3.69)$$

Примерный вид суммарной эпюры крутящих моментов для рамы тележки пассажирского электровоза показан на рис. 3.12.

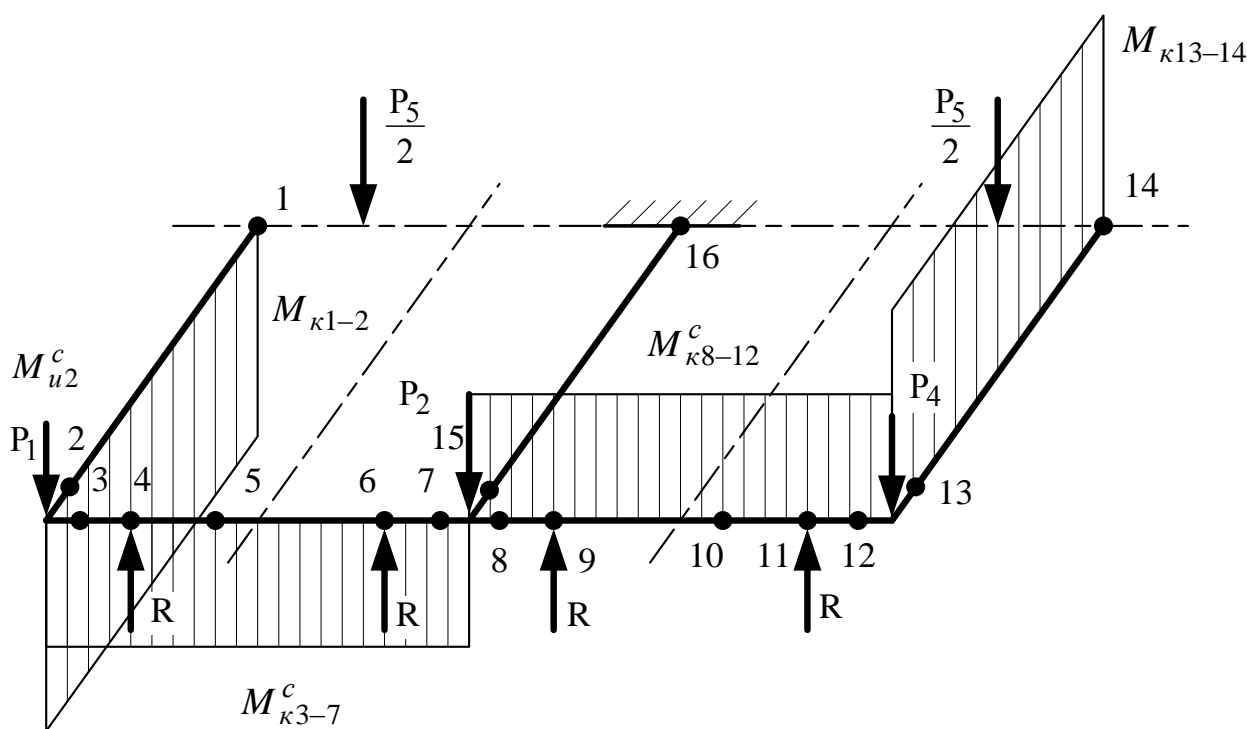


Рис. 3.12. Суммарная эпюра крутящих моментов для пассажирского электровоза

### 3.8. Расчет напряжений в сечениях рамы тележки и оценка статической прочности

Определение напряжений в расчетных сечениях (расчетных точках) рамы тележки выполняется с использованием суммарных эпюр изгибающих и крутящих моментов (для грузового электровоза – рис. 3.9 и 3.10, для пассажирского электровоза – рис. 3.11 и 3.12). При этом используются рассчитанные ранее в табл. 2.4 моменты сопротивления сечений при изгибе и кручении.

Расчет напряжений рекомендуется выполнять в форме табл. 3.1.

При заполнении табл. 3.1 необходимо **строго придерживаться указанной размерности**.

В гр. 2 и 3 записываются значения изгибающих и крутящих моментов соответственно для всех расчетных точек с учетом знака, определяемые по суммарным эпюрам. В гр. 4 и 5 указываются численные значения моментов сопротивления сечения при изгибе и кручении соответственно, определяемые по табл. 2.4. При этом необходимо предварительно определить принадлежность рассматриваемого сечения соответствующему элементу рамы.

Так, например, сечения 1, 2, 13, 14 принадлежат концевым поперечным балкам; сечения 3, 4, 11, 12 – концевым частям боковины; сечения 6, 7, 8, 9 – средней части боковины, а сечения 15, 16 – средней поперечной балке. Для середины переходной части боковины, т. е. для сечений 5 и 10, моменты сопротивления при изгибе и кручении определяются следующим образом:

$$W_{x5} = W_{x10} = \frac{W_{x4} + W_{x6}}{2}; \quad (3.70)$$

$$W_{\kappa 5} = W_{\kappa 10} = \frac{W_{\kappa 4} + W_{\kappa 6}}{2}. \quad (3.71)$$

Напряжения в сечениях рамы тележки при изгибе и кручении рассчитываются по формулам:

$$\sigma_{ui} = \frac{M_{ui}}{W_{ui}} \cdot 10^3; \quad (3.72)$$

$$\tau_{\kappa i} = \frac{M_{\kappa i}}{W_{\kappa i}} \cdot 10^3, \quad (3.73)$$

и записываются в гр. 6 и 7 табл. 3.1.

Таблица 3.1

## Расчет напряжений в сечениях рамы тележки

Номер сечения	Суммарный изгибающий момент $M_u$ , кН·м	Суммарный крутящий момент $M_k$ , кН·м	Моменты сопротивления		Напряжения		
			при изгибе $W_x, 10^{-3} \cdot \text{м}^3$	при кручении $W_k, 10^{-3} \cdot \text{м}^3$	$\sigma_u$ , МПа	$\tau_k$ , МПа	$\delta_{\Sigma}$ , МПа
1	2	3	4	5	6	7	8
1	$M_{u1}$	$M_{k1}$	$W_{x1}$	$W_{k1}$	$\sigma_{u1}$	$\tau_{k1}$	$\delta_{\Sigma 1}$
...	...	...	...	...	...	...	...
16	$M_{u16}$	$M_{k16}$	$W_{x16}$	$W_{k16}$	$\sigma_{u16}$	$\tau_{k16}$	$\delta_{\Sigma 16}$

Эквивалентные напряжения (гр. 8), используемые для оценки статической прочности, определяются согласно третьей теории прочности (теории наибольших касательных напряжений) по формуле

$$\delta_{\Sigma i} = \sqrt{\sigma_{ui}^2 + 4 \tau_{ki}^2}. \quad (3.74)$$

При оценке статической прочности рамы тележки необходимо выбрать марку стали для ее изготовления, и сравнить напряжения  $\delta_{\Sigma i}$  с допускаемым напряжением для принятой марки стали. Рамы современных электровозных тележек изготавливаются из **малоуглеродистых** или **низколегированных сталей** [3], марки которых приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

## Основные механические свойства сталей

Марка стали	Предел текучести $\sigma_T$ , МПа	Пределы выносливости, МПа	
		при симметричном цикле $\sigma_{-1}$	при пульсирующем цикле $\sigma_0$
Углеродистая обыкновенного качества: <b>В Ст3сп5</b> (ГОСТ 380-71) <b>Ст16Д</b> (ГОСТ 6713-75)	250	170	260
	235	195	300
Углеродистая низколегированная: <b>09Г2Д</b> (ГОСТ 19282-73) <b>09Г2СД</b> (ГОСТ 19282-73) <b>15ХСНД</b> (ГОСТ 19281-73)	310	210	320
	330	220	340
	350	220	340

В курсовом проекте необходимо кратко обосновать и расшифровать выбранную марку стали, привести ее основные механические свойства.

Статическая прочность считается обеспеченной, если для каждого расчетного сечения рамы тележки выполняется условие

$$\delta_{\sigma i} \leq 0,55 \sigma_T, \quad (3.75)$$

где  $\sigma_T$  – предел текучести выбранной марки стали, МПа.

Если условие (4.75) **не выполняется**, то необходимо сделать вывод о том, какие параметры рамы тележки требуют корректировки.

### 3.9. Проверка рамы тележки на усталостную прочность

Рама тележки в эксплуатации, наряду с действием нагрузок статического характера, испытывает действие **динамических (переменных) нагрузок**, возникающих при движении электровоза вследствие неровностей поверхностей катания рельсов и бандажей колесных пар. В результате этого в сечениях рамы тележки возникают **динамические напряжения**, что вызывает необходимость, кроме оценки статической прочности, производить проверку **усталостной прочности** сечений рамы.

В электровозостроении для проверки усталостной прочности несущих элементов механической части, в том числе и рамы тележки, широко используется методика ЦНИИ МПС (ВНИИЖТ) [3, 10], предполагающая работу рамы без усталостных повреждений в течение всего расчетного срока службы электровоза (30 лет).

Так как в курсовом проекте выполняется расчет рамы тележки при действии только одной статической вертикальной нагрузки, то при отсутствии информации о других видах нагрузок среднее напряжение цикла рассчитывается по формуле

$$\sigma_m = \delta_{\sigma}^{max}, \quad (3.76)$$

где  $\delta_{\sigma}^{max}$  – максимальное значение эквивалентного напряжения в проверяемом расчетном сечении, МПа, определяемое из гр. 8 табл. 3.1.

Коэффициент динамики, отражающий совместное влияние на сложное напряженное состояние рамы тележки совокупности вертикальных и горизонтальных усилий, развивающихся при движении электровоза с конструкционной скоростью по прямому участку пути, рассчитывается по эмпирической формуле С.С. Зольникова [10, с. 63]:

$$K_{\sigma} = 600 A + 16 \sqrt{A}. \quad (3.77)$$

Эмпирический коэффициент  $A$ , входящий в формулу (3.77), определяется из выражения

$$A = \frac{\sqrt{V_K}}{10,194 \delta_9^{max} f_{cm}}, \quad (3.78)$$

где  $V_K$  – конструкционная скорость, км/ч;  $f_{cm}$  – суммарный статический прогиб системы рессорного подвешивания, мм. Опыт эксплуатации, а также проведенные экспериментальные и теоретические исследования показывают, что для обеспечения значений плавности хода суммарный статический прогиб рессорного подвешивания может быть численно равен конструкционной скорости  $V_K$ , км/ч, т.е.  $f_{cm} = V_K$ .

Если **значение**  $K_\partial$ , рассчитанное по формуле (3.77), **меньше** 0,3, то для дальнейших расчетов **принимается**  $K_\partial = 0,3$ .

Амплитуда напряжения цикла при отсутствии экспериментальных данных определяется из выражения

$$\sigma_v = K_\partial \sigma_m. \quad (3.79)$$

Величина коэффициента, характеризующего чувствительность металла к асимметрии цикла, определяется по формуле

$$\psi = \frac{2 \sigma_{-1} - \sigma_0}{\sigma_0}, \quad (3.80)$$

где  $\sigma_{-1}$  – предел выносливости стали при симметричном цикле, МПа;  $\sigma_0$  – предел выносливости стали при пульсирующем цикле, МПа.

Эффективный коэффициент, учитывающий понижение выносливости детали, определяется из выражения

$$K = \beta_K \frac{K_1 K_2}{\gamma m} \eta, \quad (3.81)$$

где  $\beta_K$  – эффективный коэффициент концентрации напряжений, учитывающий форму детали;  $K_1$  – коэффициент неоднородности материала детали;  $K_2$  – коэффициент влияния внутренних напряжений в детали;  $\gamma$  – коэффициент влияния размерного фактора;  $m$  – коэффициент состояния поверхности детали;  $\eta$  – коэффициент возможного отклонения от технологии.

Для балки коробчатого сечения, сваренной из четырех отдельных листов,  $\beta_K = 1,1$ ; при приварке к горизонтальному листу балки усиливающей накладки с вытянутыми концами или языкообразной  $\beta_K = 1,5 \div 1,7$  [10, табл. 12].

Так как листы металла, образующие сечения отдельных балок рамы тележки, изготовлены прокатным способом, то  $K_1 = 1,1$  [3, с. 137], [10, с. 55].

Численное значение коэффициента  $K_2$  зависит от численного значения наибольшего из размеров (В или Н) проверяемого сечения, определяемого по табл. 2.1. При изменении указанного размера от 0,25 до 1,0 м коэффициент  $K_2$  **линейно изменяется** от 1,0 до 1,2 [3, с. 137], [10, с. 55] и его расчетное значение для проверяемого сечения определяется интерполяцией.

Для сечений, имеющих наибольший размер менее 0,25 м, коэффициент  $K_2 = 1,0$ .

Численное значение коэффициента  $\gamma$  рекомендуется принимать равным  $0,6 \div 0,76$  [3, с. 137], [10, рис. 21].

Численное значение коэффициента  $m$  после грубой станочной обработки поверхности листов рекомендуется принимать равным  $0,8 \div 0,85$  [3, с. 137]. Коэффициент  $\eta$ , согласно рекомендациям [3, с. 137], принимается равным 1,0.

**Коэффициент запаса усталостной прочности** для проверяемого сечения определяется по формуле **Серенсена–Кинасошвили** [3, с. 136], [10, с. 19]:

$$n = \frac{\sigma_{-1}}{K \sigma_v + \psi \sigma_m} \geq 2,0. \quad (3.82)$$

Если **условие усталостной прочности** по формуле (3.82) **не выполняется**, то необходимо сделать вывод о том, какие параметры рамы тележки требуют корректировки; проанализировать влияние различных параметров тележки, механические свойства сталей, параметров рессорного подвешивания и скорости движения на коэффициент запаса усталостной прочности.

### **Оформление шага по разделу 3**

#### **Подраздел 3.1**

1. В пояснительной записке представить расчетную схему тележки (для грузового электровоза – рис. 3.1, для пассажирского – 3.2).

2. Рассчитать численные значения сил, показанных на схемах, по формулам (3.1) – (3.4), для пассажирского электровоза дополнительно рассчитать нагрузки  $P_5$  и  $R_{II}$  по формулам (3.5) и (3.6) с точностью до двух знаков после запятой.

3. Рассчитать расстояния между расчетными точками по формулам (3.7)–(3.11), дополнительно для пассажирского электровоза рассчитать расстояние  $\ell_6$  с точностью до трех знаков после запятой.

### Подраздел 3.2

4. Построить эпюры изгибающих и крутящих моментов от единичных моментов  $X_1$  и  $X_2$ , используя рекомендации подраздела 3.2.

### Подраздел 3.3 и 3.4

5. Вычислить изгибающие моменты в расчётных точках рамы тележки по формулам (3.13)–(3.21) для грузового электровоза, по формулам (3.22)–(3.34) – для пассажирского. Так же для пассажирского электровоза необходимо рассчитать крутящие моменты по формулам (3.35) – (3.38). Точность расчёта – до двух знаков после запятой.

6. Построить эпюру изгибающих моментов от внешней нагрузки для грузового электровоза (пример – рис. 3.5) для пассажирского электровоза, кроме эпюры изгибающих моментов, построить эпюру крутящих (пример – рис. 3.6 и 3.7).

### Подраздел 3.5

7. Рассчитать единичные перемещения по формулам (3.41)–(3.43).

8. Рассчитать грузовые перемещения для грузового электровоза по формулам (3.46) и (3.47), для пассажирского электровоза – по формулам (3.48) и (3.49).

9. Привести систему канонических уравнений – (3.50).

10. В систему уравнений (3.50) подставить рассчитанные единичные и грузовые перемещения и рассчитать неизвестные  $X_1$  и  $X_2$ , используя функции МОБР() и МУМНОЖ() электронных таблиц Excel предварительно подготовив матрицы значений единичных и грузовых перемещений.

11. Рассчитать значения результирующих изгибающих моментов по формулам (3.51)–(3.56), а результирующих крутящих моментов – по формулам (3.57) и (3.58).

12. Построить эпюры результирующих изгибающих и крутящих моментов (пример – рис. 3.8 и 3.9).

### Подразделы 3.6 и 3.7

13. Произвести графическое сложение эпюр от внешней нагрузки с результирующей эпюрой изгибающих моментов от  $X_1$  и  $X_2$  (для грузового – рис. 3.5 и 3.8, для пассажирского – рис. 3.6 и 3.8), используя рекомендации подраздела 3.6 (или 3.7).

14. Построить суммарную эпюру (пример – рис. 3.10 – для грузового электровоза, рис. 3.11 – для пассажирского электровоза).

15. Для пассажирского электровоза произвести графическое суммирование эпюры крутящих моментов от внешней нагрузки с результирующей эпюрой крутящих моментов от  $X_1$  и  $X_2$  (рис. 3.7 и 3.9).

16. Для пассажирского электровоза построить суммарную эпюру крутящих моментов (пример – рис. 3.12).

#### Подраздел 3.8

17. Представить таблицу по форме табл. 3.1 для 16 расчетных точек рамы тележки.

18. Заполнить гр. 2 табл. 3.1, используя суммарные эпюры изгибающих моментов (для грузового электровоза – рис. 3.10, для пассажирского электровоза – рис. 3.11).

19. Заполнить гр. 3 табл. 3.1, используя суммарные эпюры крутящих моментов (для грузового электровоза – рис. 3.9, для пассажирского электровоза – рис. 3.12).

20. Заполнить гр. 4 и 5 табл. 3.1, используя рассчитанные данные табл. 2.4, учитывая при этом, что для 5-й расчетной точки моменты сопротивления определяются по формулам (3.70) и (3.71).

21. Гр. 6–8 табл. 3.1 рассчитываются по формулам (3.72)–(3.74).

22. Выбрать марку стали, используя табл. 3.2 и представить ее параметры.

23. Выполнить проверку статической прочности – выражение (3.75).

#### Подраздел 3.9

24. По табл. 3.1 (гр. 8) определить  $\delta_y^{max}$  и записать выражение (3.76).

25. Рассчитать коэффициент динамики, используя формулы (3.77) и (3.78) и рекомендации.

26. Определить амплитуду напряжения цикла по формуле (3.79).

27. Рассчитать коэффициент чувствительности металла к асимметрии цикла по формуле (3.80).

28. Рассчитать эффективный коэффициент понижения выносливости по формуле (3.81), используя приведенные рекомендации.

29. Рассчитать коэффициент запаса усталостной прочности и выполнить проверку условия (3.82).

30. Сделать комплексные выводы по всем разделам курсового проекта и представить их в заключении.



## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

При защите курсового проекта студент должен уметь дать точные и полные ответы на следующие вопросы.

1. Что называется сцепной массой электровоза?
2. Каким образом рассчитывается диаметр колеса колесной пары по кругу катания?
3. От каких параметров зависит величина модуля зубчатого зацепления?
4. Что называется клиренсом зубчатой передачи?
5. Какая проверка должна выполняться для диаметра делительной окружности зубчатого колеса?
6. Выполнение какого условия должно обеспечивать уточненное значение передаточного числа тяговой зубчатой передачи?
7. Что называется эффективной мощностью электровоза?
8. Выполнение какого условия должна обеспечивать сцепная масса грузового электровоза?
9. Выполнение какого условия должна обеспечивать сцепная масса пассажирского электровоза?
10. Из какого условия определяется минимальная длина электровоза по осям автосцепок?
11. Что называется жесткой базой электровоза?
12. Что называется жесткой базой тележки?
13. Какие параметры относятся к геометрическим характеристикам сечений?
14. Каким образом определяется масса рамы тележки?
15. Что собой представляет весовая ведомость электровоза?
16. Для чего предназначена система рессорного подвешивания электровоза?
17. Какие требования предъявляются к системе рессорного подвешивания электровоза?
18. Как устанавливается минимально допустимая величина статического прогиба системы рессорного подвешивания?
19. Из каких составляющих складывается неподрессоренная масса, приходящаяся на одну ось при опорно-осевом подвешивании тяговых двигателей?
20. Из каких составляющих складывается неподрессоренная масса, приходящаяся на одну ось при опорно-рамном подвешивании тяговых двигателей?
21. Для чего предназначена рама тележки электровоза?
22. Как конструктивно выполняется рама тележки?
23. Как называют продольные балки тележки?

24. Как подразделяют поперечные балки тележки?
25. Какие виды нагрузок в эксплуатации испытывает рама электро-возной тележки?
26. Что называется расчетной схемой рамы тележки?
27. Почему боковина рамы тележки в средней части усиливается кладкой?
28. В чем заключается цель расчетов на прочность элементов экипажной части?
29. Какие основные этапы содержит расчет на прочность?
30. Что такое статически неопределимая система?
31. Что называется степенью статической неопределимости?
32. Какие методы применяют для расчета статически неопределимых систем?
33. В чем заключается сущность метода сил?
34. Какие правила знаков приняты при расчете и построении эпюр изгибающих и крутящих моментов?
35. Каким образом рассчитываются суммарные эпюры моментов для рамы тележки?
36. Чем определяется количество возможных единичных и грузовых перемещений в раме тележки?
37. В чем смысл теоремы Верещагина?
38. Каким образом определяются напряжения в сечениях рамы тележки при изгибе и кручении?
39. Каким образом определяются эквивалентные напряжения в сечениях рамы тележки?
40. Из каких сталей изготавливаются современные рамы тележек?
41. Каким образом формулируется условие статической прочности для сечений рам тележек?
42. Какая методика используется для проверки усталостной прочности рамы тележки и в чем ее суть?

 Для подготовки по контрольным вопросам рекомендуется использовать литературу [12 и 13].

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В методическом пособии приведена методика расчета рамы тележки на статическую и усталостную прочность. Пособие содержит необходимые расчетные формулы, рекомендации по точности вычислений и выбору стандартных значений величин, допустимые значения рассчитываемых параметров, правила построений расчетных зависимостей.

После каждого раздела представлен порядок выполнения в виде шагов по данному разделу.

Использование пособия при курсовом проектировании по дисциплине «Механическая часть электроподвижного состава» позволит облегчить его оформление и подготовку к защите.

**ПРИЛОЖЕНИЕ 1**

**СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ ТЭД  
И ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОВОЗОВ**

*Таблица 1*

**Технические данные тяговых двигателей электровозов**

Тип ТЭД	Мощность ТЭД, кВт		Частота вращения якоря, об/мин			Вес ТЭД, кг	Цент- раль, мм	Попе- речная длина остова, мм	Расстоя- ние меж- ду точка- ми под- вешива- ния, мм	Серия элек- трово- за
	$P_{\text{час}}$	$P_{\text{ном}}$	$n_{\text{час}}$	$n_{\text{ном}}$	$n_{\text{max}}$					
НБ-412К	775	675	850	895	1680	4850	617,5	1090	1270	ВЛ60, 60пк
НБ-415	650	595	1050	1080	1940	3800	575	1080	1200	ВЛ82
НБ-418К6	790	740	890	915	1960	4350	604	1080	1160	ВЛ80к, с, р
НБ-504А	790	755	865	910	2040	4300	604	1060	1180	ВЛ80т
НБ-420Б	700	635	905	935	2030	4500	604	1090	1180	ВЛ82
НБ-407Б	755	720	760	770	1640	5000	636	1090	1160	ВЛ82М
НБ-413	775	695	920	970	2050	4300	600,9	1090	1200	ВЛ80В
НБ-414Б	810	740	1030	1100	2250	4000	594	1085	1170	ВЛ80, ВЛ80к
НБ-420А	700	635	885	900	2000	4500	594	1090	1180	ВЛ80
НБ-514	835	780	915	935	2040	4300	604	1090	1170	ВЛ85, ВЛ65
НБ-507А	950	890	625	665	1570	4800	604	1170	1200	ВЛ84
НБ-501	815	775	980	995	1765	3400	612	1150	1160	Sr1
ТЛ-2К	650	560	780	825	1690	4760	617,5	1080	1180	ВЛ10, ВЛ11
ТЛ-3Б	760	700	770	810	1690	5000	617,5	1090	1180	ВЛ15
НБ-520В	800	750	1030	1050	2020	3500	616	874	1703	ЭП1
ДТК-800	825	735	975	1000	1780	3850	663	852	1125	ЭП2К
НБ-514Б	817	781	920	940	2040	4300	604	955	1131.5	2ЭС5К
НТА-1200	1200	1170	1295	1295	2680	2600	602	848	1690	ЭП10
ЭДП-810	810	755	750	770	1800	4600	617,5	970	1168	2ЭС6
СТА1200А	–	1200	–	1138	2900	2410	590,5	780	1655	2ЭС10
ЭД153У1	800	720	945	980	1720	3850	662,72	852	1125	ЭП2К

**Основные технические данные  
электровозов переменного тока**

Показатели	Электровозы						
	ВЛ80 к,т,с,р	ВЛ60к	ВЛ85	ВЛ65	2ЭС5К	Sr1	ЭП1
Род службы	грузовой			универ- сальный	грузо- вой	пассажирский	
Осевая формула	2(2о-2о)	3о-3о	2(2о-2о-2о)	2о-2о-2о	2(2о-2о)	2о-2о	2о-2о-2о
Сцепная масса, т	184/192	138	276	138	192	84	132
Нагрузка от ко- лесной пары на рельсы, кН	225/235	225	225	225	235	206	215,6
Длина по осям автосцепок, мм	32840	20800	45000	22500	35004	18940	22500
Мощность часо- вого режима, кВт	6520	4590	10000	4750	6560	3220	4700
Мощность про- должительного режима, кВт	6160	4070	9400	4450	6120	3040	4400
Сила тяги в часо- вом режиме, кН	442	312	726	245	464	154	230
Сила тяги в про- должительном режиме, кН	400	259	660	225	423	139	210
Скорость в часо- вом режиме, км/ч	51,6	52	49,1	68	49,9	77	70
Скорость в про- должительном режиме, км/ч	53,6	55,6	50	70,2	51	79	72
Скорость конст- рукционная, км/ч	110	100	110	120	110	160	140
Подвешивание ТЭД	Опорно-осевое					Опорно-рамное	
Зубчатая передача	Двухсторонняя косозубая передача					1-сто- ронняя, прямо- зубая	1-сто- ронняя, шеврон- ная
Передаточное число зубчатой передачи	4,19	3,826	4,19	2,893	4,19	2,96	3,269

**Основные технические данные  
электровозов постоянного тока**

Показатели	Электровозы							
	ВЛ10	ВЛ11	ВЛ15	ВЛ82М	2ЭС4К	2ЭС6	2ЭС10	ЭП2К
Род службы	Грузовой							Пасса- жир- ский
Осевая формула	2(2о-2о)	3(2о-2о)	2(2о-2о-2о)	2(2о-2о)	2(2о-2о)	2(2о-2о)	2(2о-2о)	3о-3о
Сцепная масса, т	184	276	300	192	192	200	200	135
Нагрузка от ко- лесной пары на рельсы, кН	225	225	245	235	235	245	245	22,5
Длина по осям автосцепок, мм	32840	42260	45000	32840	35004	34000	34000	21700
Мощность часо- вого режима, кВт	5200	7800	9000	6040	6400	6440	–	4800
Мощность про- должительного режима, кВт	4500	6750	8400	5760	5920	6000	8400	4320
Сила тяги в часо- вом режиме, кН	387	581	675	415	434	464	–	192,8
Сила тяги в про- должительном режиме, кН	314	470	620	392	392	418	$\frac{538}{370}$	167,4
Скорость в часо- вом режиме, км/ч	47,3	47,3	48,6	51	52	49,2	–	87,8
Скорость в про- должительном режиме, км/ч	50	50	49,9	51,6	53,4	51	57	91
Скорость конст- рукционная, км/ч	100	100	100	110	120	120	120	160
Подвешивание ТЭД	Опорно-осевое							Опорно- рамное
Зубчатая пере- дача	Двухсторонняя косозубая передача						Односторон- ная прямозу- бая передача	
Передаточное число зубчатой передачи	3,826	3,826	4,19	3,38	4,19	3,44	6,29	2,447

*Примечание.* В числителе для электровоза 2ЭС10 указана сила тяги продолжительного режима при скорости 55 км/ч, кН, в знаменателе сила тяги продолжительного режима при скорости 80 км/ч.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бинецкий, Ю.Н. Расчет и проектирование элементов экипажной части электровозов : учеб. пособие для студентов технических специальностей вузов региона. – Хабаровск : Изд-во ДВГАПС, 1997. – 125 с.
2. Зубчатые передачи : справочник / Е.Г. Гинзбург, Н.Ф. Голованов, Н.Б. Фирун, Н.Т. Халебский; под общ. ред. Е.Г. Гинзбурга. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л. : Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1980. – 416 с.
3. Магистральные электровозы: Общие характеристики. Механическая часть / В.И. Бочаров [и др.]. – М. : Машиностроение, 1991. – 224 с.
4. Магистральные электровозы. Механическая часть электровозов / П.И. Аброскин [и др.]. – М. : Машиностроение, 1967. – 436 с.
5. Исаев, И.П. Расчет конструкций электроподвижного состава на вычислительных машинах / И.П. Исаев, А.А. Перова, Г.П. Бурчак. – М. : Транспорт, 1966. – 256 с.
6. Механическая часть тягового подвижного состава : учеб. для вузов / под ред. И.В. Бирюков. - Репринтное изд. – М. : Альянс, 2013. – 440 с.
7. Беляев, Н.М. Соппротивление материалов / Н.М. Беляев. – М. : Наука, 1976. – 607 с.
8. Соколов, М.М. Гасители колебаний подвижного состава : справочник / Соколов, М. М., Варава В. И., Левит Г. М. – М. : Транспорт, 1985. – 216 с.
9. Медель, В.Б. Проектирование механической части электроподвижного состава / В.Б. Медель. – М. : Всесоюзн. изд.-полиграф. объедин. МПС, 1963. – 424 с.
10. Сварные конструкции локомотивных тележек / под ред. К.П. Королева. – М. : Транспорт, 1971. – 72 с.
11. Единая система конструкторской документации. Основные положения. – М. : Гос. ком. СССР по стандартам, 1984. – 344 с.
12. Шамин, А.А. Механическая часть подвижного состава : курс лекций. В 2 ч. Ч. 1 / А.А. Шамин. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2001.
13. Трофимович, В.В. Механическая часть подвижного состава : курс лекций. В 2 ч. Ч. 2 / В.В. Трофимович. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2006.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ДАННЫХ ЭЛЕКТРОВОЗА .....	5
2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ РАЗМЕРОВ ЭКИПАЖНОЙ ЧАСТИ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЕЧЕНИЙ РАМЫ ТЕЛЕЖКИ.....	12
2.1. Определение основных размеров тележки и экипажной части...	12
2.2. Определение геометрических размеров сечений балок рамы тележки .....	16
2.3. Расчет геометрических характеристик сечений рамы тележки....	18
2.4. Определение массы элементов экипажной части и составление весовой ведомости.....	23
3. РАСЧЕТ РАМЫ ТЕЛЕЖКИ НА СТАТИЧЕСКУЮ И УСТАЛОСТНУЮ ПРОЧНОСТЬ .....	30
3.1. Составление расчетной схемы рамы тележки и определение величины действующих нагрузок .....	30
3.2. Построение единичных эпюр изгибающих и крутящих моментов.....	34
3.3. Расчет и построение эпюры изгибающих моментов от внешней нагрузки для грузового электровоза .....	36
3.4. Расчет и построение эпюр изгибающих и крутящих моментов от внешней нагрузки для пассажирского электровоза.....	38
3.5. Расчет единичных и грузовых перемещений, определение численных значений моментов $X_1$ и $X_2$ .....	40
3.6. Расчет и построение суммарных эпюр для грузового электровоза .....	46
3.7. Расчет и построение суммарных эпюр для пассажирского электровоза .....	47
3.8. Расчет напряжений в сечениях рамы тележки и оценка статической прочности .....	50
3.9. Проверка рамы тележки на усталостную прочность .....	52
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ .....	57
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	59
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ ТЭД И ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОВОЗОВ .....	60
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	63



Учебное издание

**Доронина Ирина Ивановна**  
**Трофимович Виталий Владимирович**

**РАСЧЕТ РАМЫ ТЕЛЕЖКИ ЭЛЕКТРОВОЗА  
НА ПРОЧНОСТЬ**

Методическое пособие  
для выполнения курсового проекта

***Отпечатано методом прямого репродуцирования***

Технический редактор *Н.В. Ларионова*

---

План 2017 г. Поз. 1.5. Подписано в печать 26.09.2017.  
Гарнитура Arial. Печать RISO. Усл. печ. л. 3,7. Уч.-изд. л. 4,0.  
Зак. 202. Тираж 30 экз. Цена 167 р.

---

Издательство ДВГУПС  
680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, 47.





Кафедра «Локомотивы»

И.И. Доронина, В.В. Трофимович

# **РАСЧЕТ РАМЫ ТЕЛЕЖКИ ЭЛЕКТРОВОЗА НА ПРОЧНОСТЬ**

Методическое пособие  
для выполнения курсового проекта

Хабаровск  
2017