

МЕХАНИКА, ТЕМІР YO'Л MASHINASOZLIGI, MATERIALSHUNOSLIK

УДК (UDC) 629.486

## DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL FOR CALCULATING THE STRENGTH OF THE MAIN FRAME OF THE VL80s ELECTRIC TRUCK BODY FOR RAILWAY ENGINEERING

Хромова Г.А.<sup>1</sup>, Раджибаев Д.О.<sup>1</sup>, Хромов С.А.<sup>1</sup>  
Khromova G.A.<sup>1</sup>, Radjibaev D.O.<sup>1</sup>, Khromov S.A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> – Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта  
(Ташкент, Узбекистан)

<sup>1</sup> – Tashkent Institute of Railway Engineers (Tashkent, Uzbekistan)

**Abstract:** A mathematical model was developed for the main body frame of the VL80s locomotive for railway engineering, including the justification of the design modes available in operation, the calculation of quasistatic characteristics for static loading modes, for single-thrust and double-thrust modes, for compression and tension modes. A calculation is also made on the effect of distributed inertial loads, then the power factors and stresses in the calculated sections of the main body frame of the VL80s electric locomotive are calculated. Summarizing conclusions are given on the maximum voltages in the design modes of the main frame of the VL80s electric locomotive after upgrading with amplification..

**Key words:** VL80s electric locomotive, locomotive, body frame, calculation of quasistatic characteristics, inertial loads.

## РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАСЧЕТА НА ПРОЧНОСТЬ ГЛАВНОЙ РАМЫ КУЗОВА ЭЛЕКТРОВОЗА ВЛ80с ДЛЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ

**Аннотация:** В работе осуществлена разработка математической модели главной рамы кузова локомотива ВЛ80с для железнодорожного машиностроения, в том числе проведено обоснование расчетных режимов, имеющих в эксплуатации, проведен расчет квазистатических характеристик для режимов статического нагружения, для режимов одиночной тяги и двойной тяги, для режимов сжатия и растяжения. Также проводится расчет на воздействие распределенных инерционных нагрузок, далее вычислены силовые факторы и напряжения в расчетных сечениях главной рамы кузова электровоза ВЛ80с. Приводятся обобщающие выводы по максимальным напряжениям в расчетных режимах главной рамы электровоза ВЛ80с после проведения модернизации с усилением.

**Ключевые слова:** электровоз ВЛ80с, локомотив, рама кузова, расчет квазистатических характеристик, инерционные нагрузки.

При создании подвижного состава нового поколения, а также модернизации существующего, с учетом повышенных скоростей движения, одной из первоочередных задач является обеспечение прочных и надежных рамных конструкций локомотивов с целью улучшения динамических качеств и продления срока эксплуатации.

При текущих ремонтах было установлено значительное число усталостных трещин рам тележек и рам кузовов локомотивов (электровозов, тепловозов). При этом даже заваренные трещины продолжают развиваться и увеличиваться в размере, ослабляя наиболее опасные

сечения. Существующие нормы (например, инструкция ЦТ-336) не предусматривает резкоконтинентальных климатических условий Республики Узбекистан, а также динамического воздействия сложной нагруженности тяговых усилий, передающихся на рамные конструкции локомотивов объёмной конфигурации. Очевидно, что общее напряженное состояние главной рамы кузова и рам тележек локомотивов, а также их несущих эквивалентных каркасов будет значительным образом зависеть от продольных, поперечных и крутильных динамических составляющих тяговых усилий, возникающих в рамных каркасах сложной конфигурации, а также рациональной конструкции установки усиливающих накладок при модернизации и контактных напряжений, возникающих при резких перепадах температур. Эти факторы вызывают снижение общего срока эксплуатации локомотивов в 1.2 – 1.5 раза [1-3].

Однако к настоящему времени недостаточно развиты вопросы теории колебаний и прочности главных рам кузовов и рам тележек локомотивов, имеющих сложную пространственную конфигурацию, с учетом влияния контактных динамических нагрузок, продольных, поперечных и крутильных составляющих тяговых усилий при повышенных скоростях движения, а также методы их рационального конструирования и модернизации.

Данная статья посвящена проблеме повышения прочности главной рамы кузова электровоза ВЛ80с при эксплуатации его в условиях Средней Азии и Казахстана. В процессе эксплуатации на несущую главную раму кузова электровоза действует ряд внешних нагрузок. При прочностных расчетах по методу суперпозиции обычно исходят из принципа независимости действия сил. Напряжения в элементах конструкции при каком-либо режиме находят как сумму напряжений, возникающих от каждого из видов нагрузки в отдельности [1-3].

Наиболее существенными для прочности конструкции являются следующие нагрузки [2]:

- *вертикальные статические нагрузки:*

а) от веса оборудования, установленного в кузове электровоза;

б) от собственного веса конструкции и экипировочных материалов (запаса топлива, воды, песка, смазочных материалов);

Напряжения от вертикальной нагрузки определяют для следующих случаев опирания кузова:

а) на тележки - учитывается случай, когда все опорные реакции одинаковы, а также наиболее неблагоприятное распределение реакций опор при максимальной разнице, равной 30%, в том числе при кососимметричной нагрузке);

б) на домкраты;

в) при аварийной подъёмке локомотива за автосцепку.

- *наибольшие тяговые усилия в режиме двойной тяги:*

а) при трогании с места;

б) при конструкционной скорости;

в) при скоростях, соответствующих резонансным состояниям, если они достаточно четко выражены.

- *продольные усилия при растяжении или сжатии*, приложенные по осям автосцепок для электровоза ВЛ80 были приняты 2,5 МН [3-4].

- *динамические вертикальные нагрузки*, действующие при движении электровоза с конструкционной или резонансной скоростью; (нами используется методика ВНИИЖТа [3] с учетом коэффициента динамики  $K_d$ . При этом динамические нагрузки следует оценивать по формуле:  $P_d = P_{ст} * K_d$ , конкретно, для локомотивов рекомендуется следующая эмпирическая формула:

$$K_d = 600 \cdot A + 16 \cdot \sqrt{A} \quad (1)$$

где  $A = \frac{\sqrt{V}}{\sigma_{ст} * f_{ст}}$ , где  $f_{ст}$  - суммарный статический прогиб рессорного подвешивания, мм;  $V$  - скорость движения, км/ч.

5. *Нагрузки на кузов при рывках и соударениях локомотивов*, которые включают усилия, приложенные вдоль оси автосцепок, и силы инерции тележек и агрегатов, расположенных в кузове электровоза. Наибольшие значения усилий, приложенных по оси автосцепок, при расчете были приняты равными для электровоза ВЛ80с 2,5 МН, которые при существующих поглощающих аппаратах соответствуют соударениям со скоростями 5÷7 км/ч.

При расчете шкворневых балок, шкворней, тяг, опорных балок и узлов крепления оборудования к раме продольные ускорения тележек и другого оборудования локомотива принимают равными  $3g$ .

В качестве расчетных принимают те режимы, которые соответствуют наиболее неблагоприятному сочетанию указанных нагрузок (см. п. 1÷5), действующих в условиях эксплуатации одновременно.

При *оценке статической прочности несущей главной рамы кузова электровоза* в качестве расчетных принимают следующие режимы:

- трогание электровоза с места (нагрузки 1 а) и 2 а));
- движение локомотива в тяговом режиме (нагрузки 1а), 2 б) и 4));
- ремонтно-аварийный (нагрузки 1 б) и 1 в))

При *оценке сопротивления усталости* учитывают нагрузки 1а), 2 б) и 4) при оценке прочности кузова при соударениях – нагрузки 1 а) и 5).

Оценка *статической прочности* производится по допускаемым напряжениям. Для трогания с места и движения в тяговом режиме принимают  $[\sigma] = 0.65 \cdot \sigma_T$ ; для продольного растяжения (сжатия) ремонтно-аварийного режима  $[\sigma] = 0.95 \cdot \sigma_T$ , где  $\sigma_T$  - предел текучести материала.

Оценка *сопротивления усталости* производилась по коэффициенту запаса  $n$ , который не должен быть менее  $[n_{уст}] = 2$ .

Для элементов, передающих продольные усилия, шкворневых узлов, буферных брусьев, тяг, а также в тяговом режиме определяется запас прочности, предусматривающий периодические приложения и снятия тягового усилия (пульсирующий цикл):

$$n = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_f \cdot (k + \varphi)} \geq 1, \quad (2)$$

где  $\sigma_{-1}$  – предел выносливости при симметричном цикле;  $\sigma_f$  – напряжения от тяговых усилий;  $k$  – коэффициент, характеризующий понижение предела выносливости детали;  $\varphi$  – коэффициент, характеризующий чувствительность материала к асимметрии цикла, который равен согласно [3] при растяжении-сжатии и изгибе  $0.1 \div 0.2$  – для углеродистых сталей;  $0.2 \div 0.3$  – для легированных сталей, при кручении – соответственно  $0 \div 0.1$  и  $0.1 \div 0.15$ .

Для расчета принимались параметры для Ст3, которая имеет следующие характеристики: предел выносливости при симметричном цикле  $\sigma_{-1} = 19,5$  МПа; предел текучести не менее  $\sigma_T = 240$  МПа; временное сопротивление  $\sigma_B = 425$  МПа. Допускаемые напряжения на растяжение (сжатие):

$$[\sigma] = 115 \div 195 \text{ МПа.}$$

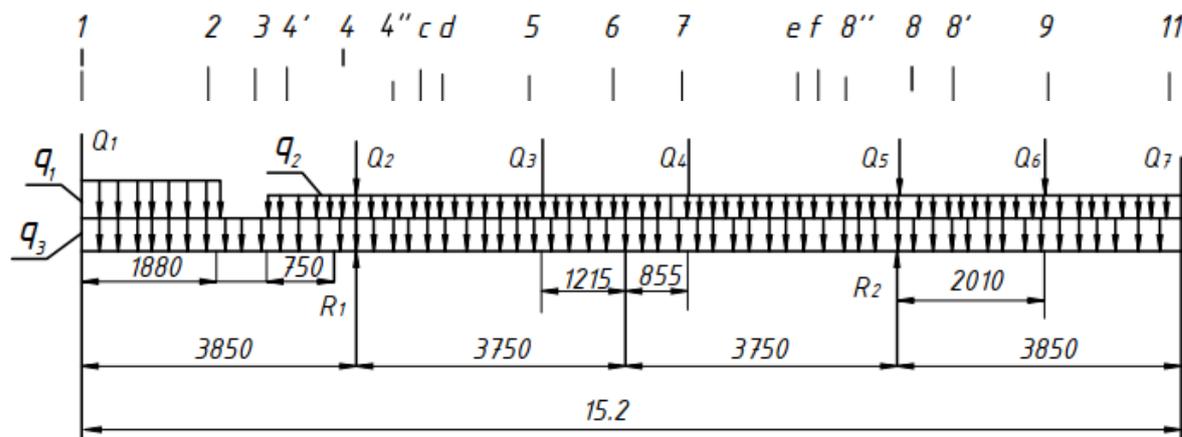
Боковины рамы кузова электровоза рассчитываются на прочность в следующих режимах [2-3]:

А. Режимы статического нагружения:

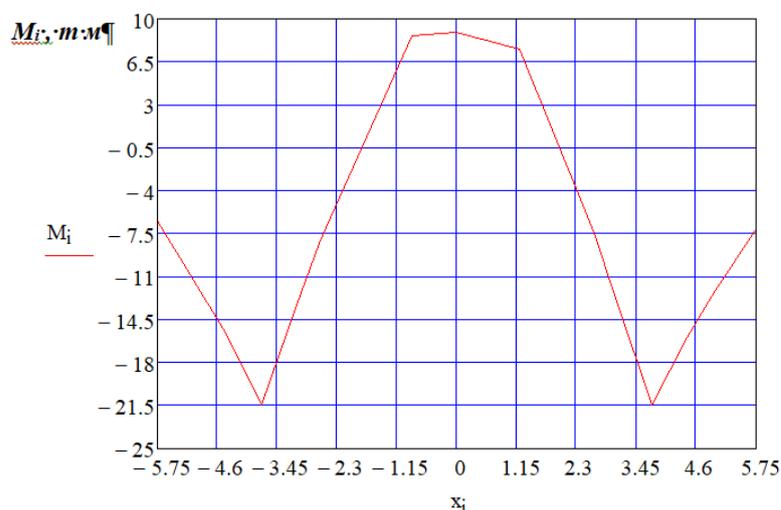
1. Режим весового нагружения;
2. Режим одиночной тяги;
3. Режим двойной тяги;
4. Режим сжатия силами 2,5 МПа (250 т), действующими по оси автосцепки;
5. Режим растяжения силами 2,5 МПа (250 т), действующими по оси автосцепки.

Б. Режимы инерционного нагружения:

1. Режим удара в автосцепку силой 2,5 МПа (250 т);
2. Режим рывка на автосцепку силой 2,5 МПа (250 т).



**Эпюра изгибающих моментов для весового нагружения  $M_{изг}$**



**Рисунок 1. Расчетная схема весового нагружения главной рамы кузова электровоза ВЛ-80с (а) и построенная эпюра изгибающих моментов (б).**

Наибольшее значение допускаемых напряжений для наиболее тяжелых режимов статического и ударного нагружения силой 2,5 МПа (250 т) на автосцепке, в соответствии с требованиями ЦНИИ МПС России, принято равным:

$$[\sigma] \leq \sigma_T / n_{oy} \quad (3)$$

где  $n_{oy}$  - нормативный коэффициент запаса;

$\sigma_T$  - предел текучести, для Ст.3 (1 разряда толщины)  $\sigma_T$  не менее 240 МПа.

Наименьшее допускаемое значение действительного коэффициента запаса при этих режимах определяется по формуле:

$$n_{oy} = \frac{\sigma_m}{\beta_k (\sigma_y + \sigma_{cm})} \geq 1.1. \quad (4)$$

В этой формуле  $(\sigma_y + \sigma_{cm})$  - максимальное суммарное напряжение при ударном (или статическом нагружении) силой 2,5 МПа (250 т) по оси автосцепки с учетом весовых напряжений;  $\beta_k$  - коэффициент концентрации напряжений.

У рассчитываемой рамы кузова электровоза ВЛ80с конструктивными и технологическими мерами обеспечено отсутствие концентраций напряжений в местах переходов от не усиленного профиля к усиленному и в местах примыкания к боковине поперечных элементов рамы кузова. Это подтверждено результатами испытаний облегченной рамы в ее окончательном варианте [3-4], во время которых ни в одном из восьми мест примыкания шкворневых балок к боковине, ни в одной из точек перехода от не усиленного профиля к усиленному и наконец, ни в одном из четырех мест примыкания боковин к буферным брускам не было обнаружено напряжений, которые бы превысили расчетные.

Аналогичный результат был ранее получен и для рамы тележек с боковинами из фасонного проката (двух швеллеров), где даже при вибрационном нагружении разницу в значениях предела усталости для прямой гладкой стороны боковины и для стороны с примыкающими буксовыми кронштейнами не обнаружено. Все эти результаты многократно проверялись опытом, при этом применялись малобазные тензометрические датчики, база которых (10мм) во много раз (в отдельных случаях - в десятки раз) меньше определяющих размеров переходных элементов [2-4].

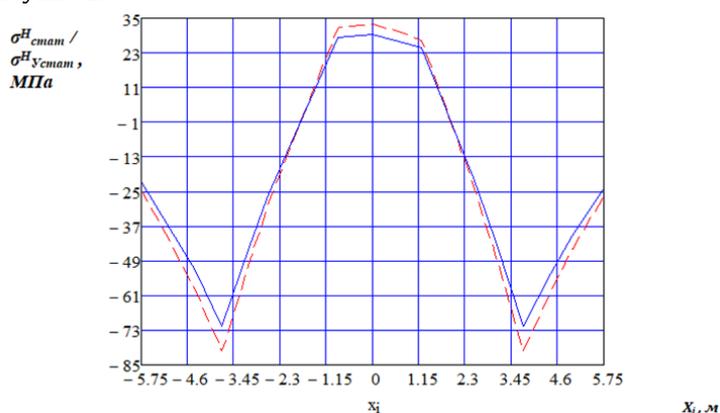
Для узлов рамы кузова, конструкция которых была изменена одновременно с изменением (облегчением) боковины, все это позволяет принять коэффициент  $\beta_k=1$ . Следовательно

$$[\sigma] = [\sigma_y + \sigma_{CT}] = 218 \text{ МПа} \quad (5)$$

В расчете рамы в запасе прочности не учитывается работа боковых стенок, пола и других конструкций кузова, хотя, как показали результаты испытаний [2-3] их участие в сопротивлении кузова внешним и внутренним нагрузкам значительно.

На рисунке 1 представлены расчетная схема весового нагружения главной рамы кузова электровоза ВЛ-80с (а) и построенная эпюра изгибающих моментов (б). В расчетной схеме весового нагружения главной рамы кузова электровоза ВЛ80с сосредоточенные нагрузки приняты приложенными в местах крепления балок к боковинам (рис. 1), так как вес оборудования, расположенного в кузове, передается боковинам поперечными балками рамы кузова. При этом обозначения 4' и 8' относятся к сечениям боковины, вплотную примыкающим к шкворневым балкам со стороны брусков автосцепки, а 4'' и 8'' - соответственно со стороны трансформатора.

На рисунке 1,б построена эпюра изгибающих моментов. На этой эпюре построение выполнено со стороны сжатых волокон. Эпюра напряжений в нижних волокнах приведена на рисунке 2.



**Рисунок 2. Распределение изгибающих напряжений от весового нагружения в нижних волокнах сечений боковины главной рамы кузова электровоза ВЛ80с.**  
 — усиленной боковины рамы  $\sigma_{устат}^B$ ;  
 - - - до усиления  $\sigma_{устат}^B$ .

В результате проведенного расчета с использованием ЭВМ получены максимальные напряжения в расчетных режимах, определяющие прочность боковин рамы кузова электровоза ВЛ80с после проведения модернизации с усилением путем установки усиливающих накладок, которые сведены в таблицу 1.

**Таблица 1**

**Максимальные напряжения в расчетных режимах главной рамы электровоза ВЛ80с после проведения модернизации с усилением путем установки усиливающих накладок.**

№№ п/п	Наименование режима		Максимальное напряжение, МПа
1.	Весовое нагружение (рис. 1)		- 21,5 МПа
2.	Одиночная тяга	Дополнительные напряжения	+ 49,6
		Суммарные с весовыми	+ 66,0
3.	Двойная тяга	Дополнительные напряжения	+97,5
		Суммарные с весовыми	+114,0
4.	Сжатие силами 250т (2.5 МН) по оси автосцепок	Дополнительные напряжения	-198,5
		Суммарные с весовыми	-211,8
5.	Растяжение силами 250т (2.5 МН) по оси автосцепок	Дополнительные напряжения	+198,5
		Суммарные с весовыми	+215,3
6.	Удар силой 250 т (2.5 МН) в автосцепку	Дополнительные напряжения	-174,8
		Суммарные с весовыми	-198,1
7.	Рывок силой 250 т (2.5 МН) на автосцепке	Дополнительные напряжения	+174,8
		Суммарные с весовыми	+174,8

На основании данных таблицы 1 можно сделать следующие выводы:

1. Максимальные значения суммарных напряжений, вычисленные для возможных наиболее неблагоприятных сочетаний нагрузки расчетных режимов нагружения модернизированной главной рамы электровоза ВЛ80с, не превышают допускаемые.
2. Усиление главной рамы кузова путем установки усиливающих накладок приводит к снижению максимальных напряжений по сравнению с существующей конструкцией на 10÷15 % в зависимости от режима нагружения.

#### Литература

1. Динамика локомотивов / М.А. Ибрагимов, В.И. Киселев, В.А. Рамлов, А.В. Скалин: уч. пос. – М.: РГОТУПС, 2005. – 128 с.
2. Механическая часть подвижного состава / Под ред. И.С. Бирюкова, А.Н. Савоськина и др. М.: Транспорт, 1992. – 440 с.
3. Прочность и безотказность подвижного состава железных дорог / Под. ред. д.т.н., проф. А.Н. Савоськина. – М: Машиностроение, 1990. – 288 с.
4. Хромова Г.А. Кулахметов А.П. Исследование колебаний электровоза ВЛ-80с при его движении в кривых участках рельсового пути // Вестник ТашИИТ, 2009. – №6. – С. 28-32.

#### References

1. Locomotive Dynamics / M.A. Ibragimov, V.I. Kiselev, V. A. Ramlov, A.V. Skalin: textbook. – М.: RGOTUPS, 2005. – 128 p.
2. The mechanical part of the rolling stock / Edited by I.S. Biryukova, A.N. Savos'kina and other. М.: Transport, 1992. – 440 p.
3. Strength and reliability of rolling stock of railways / Edited by Doctors of technical science, Professor A.N. Savos'kina. – М: Mashinostroenie, 1990. – 288 p.
4. Hromova G.A. Kulahmetov A.P. Study of the vibrations of the VL-80s electric locomotive during its movement in curved sections of the rail // Vestnik TashIIT, 2009. – №6. – P. 28-32.

**Сведения об авторах / Information about the authors**

**Хромова Галина Алексеевна** – д.т.н., профессор, Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта.

**Хромов Сергей Алексевич** – к.т.н., доцент, Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта.

**Раджибаев Даврон Октамбаевич** – к.т.н., доцент, Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта. E-mail: [davronmail@bk.ru](mailto:davronmail@bk.ru)

**Galina Khromova** - doctor of technical Sciences, Tashkent Institute of railway transport engineers.

**Sergey Khromov** - candidate of technical Sciences, Tashkent Institute of chemical technology.

**Davran Radjibaev** - candidate of technical Sciences, Tashkent Institute of chemical technology.  
E-mail: [davronmail@bk.ru](mailto:davronmail@bk.ru)