

УДК 621.33

DOI: 10.15587/1729-4061.2019.160423

## Аналитический метод составления и использования балластной карты тягового агрегата ПЭ2У

Д. О. Банников, А. В. Радкевич

*В практиці експлуатації електровозів керування тягових агрегатів серії ПЕ2У досить часто, особливо в останні десятиріччя, виникає необхідність в різних видах ремонту і відновлення вже досить зношеного парку цих машин. При цьому змінюється важливіший показник в роботі машини – розподіл мас, і відбувається розбалансування машини, яке може досягати 30 %. Подальша експлуатація такого електровозу призводить до зниження його тяги на 40–100 кН, скорочення строку служби ходової частини в середньому на 8–10 років, а також необхідності зниження швидкості машини під час експлуатації на 10–15 км/год.*

*Завдяки відсутності належної нормативної бази та рекомендацій фахової літератури подібні балансувальні роботи виконуються фактично ітераційним шляхом з довільним розміщенням елементів баласту, що нерідко затягує строки робіт і призводить до їх неякісного виконання.*

*Одним з можливих шляхів розв'язання подібної проблеми є розробка і впровадження спеціального теоретичного методу, який дозволяє аналітично обґрунтувати запропоновані конструктивно-технологічні рішення щодо розташування баласту електровозу керування тягового агрегату ПЕ2У. При цьому баласт формується із окремих малорозмірних елементів, які укладаються рядами в наявні конструктивні полости несучої рами. В результаті складається так звана індивідуальна балластна карта для кожної машини.*

*Підхід, що пропонується, включає два етапи розрахунків і дозволяє не тільки отримувати практично прийнятні схеми розташування баласту, але й також суттєво скоротити кількість зважувань машини, необхідних для цього. Підхід був апробований на низці машин електровозів керування тягових агрегатів серії ПЕ2У в 2010–2012 рр. і може бути офіційно використаний в спеціалізованій нормативній документації. Його практична погрішність не перевищує 3 % і обумовлена головним чином технологічними чинниками*

*Ключові слова: локомотив, електровоз, тяговий агрегат ПЕ2У, балансування машини, балластна карта*

### 1. Введение

Электровозы управления тяговых агрегатов постоянного тока серии ПЭ2У предназначены для эксплуатации на различных участках горных выработках, карьерах, шахтах и промышленных железнодорожных путях (рис. 1). При этом довольно часто, особенно в последние десятилетия, возникает необходимость в различных видах ремонта и восстановления уже достаточно изношенного парка этих машин.

В большинстве случаев ремонтные работы выполняются на специализированных предприятиях или заводах-изготовителях этих машин, как например, на Днепровском электровозостроительном заводе (ДЭВЗе), Украина, – основном изготовителе тяговых агрегатов серии ПЭ2. Также следует упомянуть Новочеркасский электровозостроительный завод (НЭВЗ), Россия, который в отличие от ДЭВЗа специализируется на производстве тяговых агрегатов переменного тока серий ОП и НП. Однако, начиная примерно с 2010 г., НЭВЗ также занимается обслуживанием и ремонтом тяговых агрегатов постоянного тока. Известный немецкий завод Lokomotivbau Elektrotechnische Werke (LEW) в период 1957–1967 гг. выпустил партию полуэкспериментальных тяговых агрегатов на базе электровозов серии EL, имеющих дизельный привод, что предопределяет иную компоновку машины. Начиная с 1999 г., в Германии выполняется их частичная модернизация, связанная с переходом на электрическую систему управления.

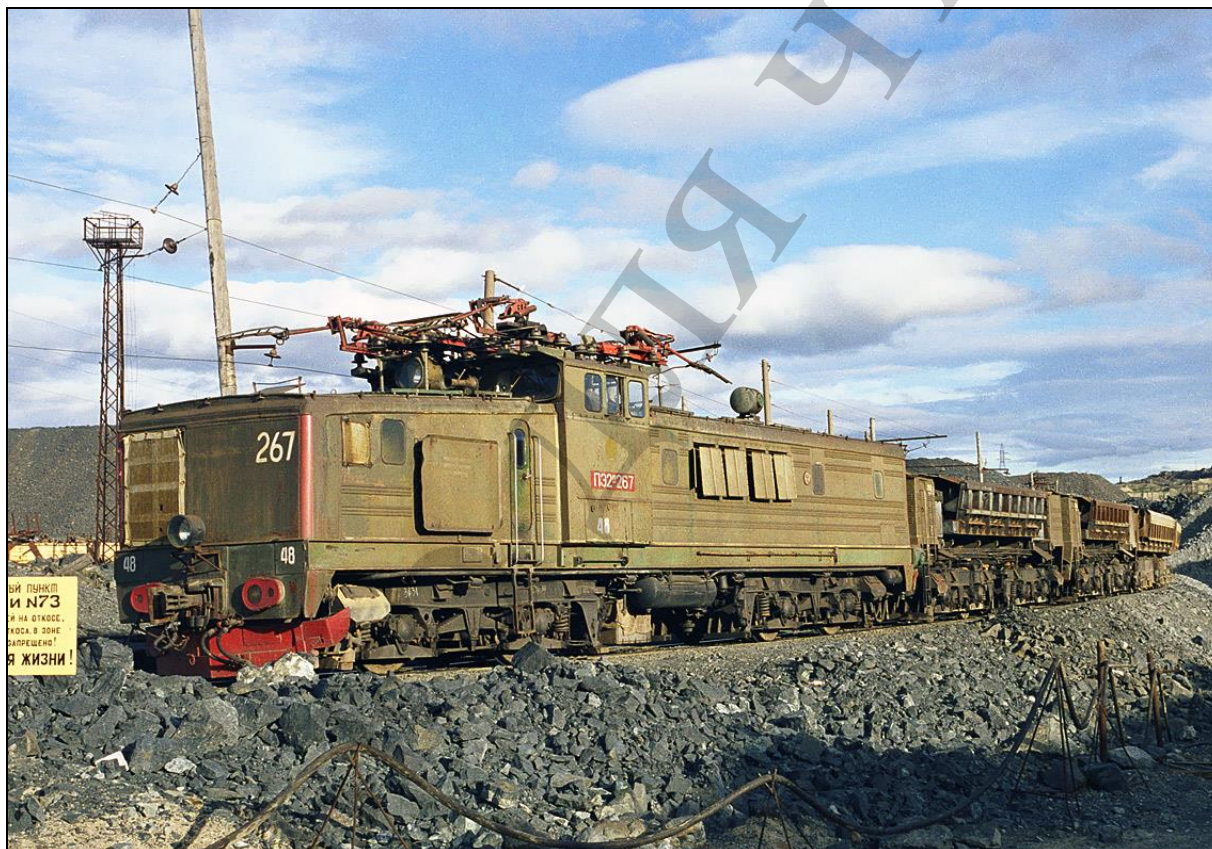


Рис. 1. Эксплуатация электровоза управления тягового агрегата серии ПЭ2У

Подобный ремонт может включать в себя ремонт или замену изношенных или поврежденных элементов как самой несущей конструкции корпуса электровоза, так и элементов его оборудования. При этом изменяется важнейший показатель в работе машины – распределение масс, и происходит разбалансировка машины. Так по данным, предоставленным заводом-изготовителем ДЭВЗ, давление на колесные пары передних и задних осей может отличаться на 15–20 %, а бортовая разбалансировка достигать в отдельных случаях 30 %.

Дальнейшая эксплуатация такого электровоза приводит к возникновению существенных скручивающих усилий в элементах корпуса машины, ведущих к падению тяги на 40–100 кН, а также повышенному износу ее ходовой части, срок службы которой сокращается в среднем на 8–10 лет. В свою очередь, это приводит к необходимости снижения скорости машины в процессе эксплуатации, иногда на 10–15 км/ч, для сохранения верхнего строения железнодорожного пути. Заметим также, что подобная ситуация является характерной для современных условий не только Украины, но также и ряда стран СНГ, как например, России или Казахстана, использующих тяговые агрегаты серии ПЭ2У, произведенные еще в 60–80-х годах XX века.

Поскольку к настоящему времени альтернативных машин, производимых в Украине, не существует, то для поддержания работоспособности самих тяговых агрегатов и железнодорожных путей необходима балансировка электровозов управления после ремонтных работ. С этим связана актуальность работы в данном направлении, теоретически позволяющая продлить срок и качество эксплуатации машин серии ПЭ2У.

## **2. Анализ литературных данных и постановка проблемы**

Основным и, пожалуй, единственным выходом в данной ситуации является балансировка машины с помощью добавления специального балласта. При этом возникает проблема расположения балласта в корпусе машины таким образом, чтобы обеспечить в первую очередь максимально симметричное распределение массы машины. Также масса такого балласта должна быть минимально необходимой, чтобы не нужным образом дополнительно не утяжелять машину. Решение данной проблемы особенно усложняется в случае, если имеется ограничение по максимально допускаемой нагрузке на рельсовые пути на каких-либо участках железных дорог.

К настоящему времени в Украине отсутствует нормативная база, касающаяся разработки, создания и эксплуатации локомотивов в целом и электровозов в частности. Чаще всего при необходимости уточнения каких-либо вопросов, связанных с оценкой несущей способности машин, используются морально устаревшие нормы [1], ориентированные как раз на локомотивы, производившиеся в XX веке. Поэтому организацией-разработчиком машины (ДЭВЗом) был создан собственный стандарт [2], позволявший дополнительно регулировать данные вопросы.

Однако оба этих нормативных документа не содержат каких-либо указаний относительно возможности балансировки электровозов или тяговых агрегатов после выполнения ремонтно-восстановительных работ не только с помощью балласта, но и каким-либо иным методом. Действующие нормы России [3], на территории которой используется в настоящее время большая часть парка тяговых агрегатов серии ПЭ2У, также опускают полностью данный аспект. Данному вопросу также практически не уделяется внимания и в современной периодической специализированной литературе (например [4]).

Бурное развитие компьютерной техники в начале XXI века дало толчок для развития качественно новых подходов к проектированию машинострои-

тельных конструкций в целом, и локомотивов в частности. Так один из численных методов строительной механики – метод конечных элементов (МКЭ) – получил очень широкое развитие [5], особенно благодаря возможности его реализации в виде специализированных пакетов прикладных программ. В зарубежной практике были разработаны достаточно универсальные программные комплексы, такие, как например ANSYS, имеющий к настоящему времени уже 4 практические реализации [6]. Также не менее мощным программным продуктом является SolidWorks [7], позволяющий анализировать работу в первую очередь подвижных механизмов и систем. Упрощенной версией данного продукта является другая разработка – CosmosWorks [8], которая не предполагает использование стержневых элементов, что нередко затрудняет процесс моделирования конструкций. Еще одной довольно известной и распространенной в проектной практике разработкой является комплекс NASTRAN [9].

Все перечисленные программные продукты ориентированы в первую очередь на оценку статической несущей способности конструкции в линейной или нелинейной постановке [10]. Также возможно проведение динамического анализа работы конструкции, что особенно актуально для машиностроительной сферы [11]. При этом имеется возможность оценивать и процессы разрушения конструкционных материалов [12]. Однако, как раз решение задач статической балансировки машин в этих комплексах не предусмотрены. Наиболее мощные и популярные программные продукты, такие как SCAD for Windows или Lira for Windows также не содержат возможности для решения задач оценки пространственной устойчивости конструкций. Да и в целом, эти разработки носят во многом строительный характер, что существенно затрудняет их применение в машиностроительной сфере [13].

В связи с такой ситуацией в практике эксплуатации и обслуживания локомотивов, электровозов и иных единиц подвижного состава железных дорог необходимые работы по балансировке машин после ремонта выполняются фактически «вслепую». Используются подручные инструменты, с помощью которых балансировка осуществляется на основе накопленного опыта, без должного теоретического обоснования. При этом в качестве балласта используют имеющиеся в наличии куски металлопроката, имеющие случайную массу и различные геометрические размеры. Такие «элементы» балласта располагаются случайным, как правило хаотическим, способом в плоскости несущей рамы электровоза для улучшения балансировки машины. Подобные работы проводятся многократно, фактически итерационным способом, и требуют, соответственно, многократного взвешивания электровоза, что практически часто оказывается трудно осуществимым.

В результате нередко имеет место как затягивание сроков самих балансировочно-отладочных работ, так и их явно поверхностное и некачественное выполнение. Это, в свою очередь, сказывается самым негативным образом на сроках и качестве дальнейшей послеремонтной эксплуатации машин. В практике имеют место случаи возникновения не только технических сложностей при этом, но и аварийных ситуаций, связанных со сходом машин с путей либо их столкновениями с другими единицами подвижного состава [14]. Это при-

водит не только к существенному материальному ущербу, но и часто к гибели людей [15].

### **3. Цель и задачи исследования**

Целью работы является разработка и внедрение специального теоретического подхода, позволяющего аналитически обосновать предлагаемые конструктивно-технологические решения по расположению балласта электровоза управления тягового агрегата ПЭ2У. При этом составляется так называемая индивидуальная балластная карта для каждой машины.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи:

- разработать технологичную конструкцию балласта электровоза управления, позволяющую выполнять компактную и простую установку балласта и, при необходимости, его оперативную замену;
- теоретически описать определение необходимого количества и массы балласта, а также его пространственного размещения в машине;
- практически апробировать разработанный теоретический подход на реальных машинах серии ПЭ2У.

### **4. Материалы и методы исследования для составления балластной карты**

#### **4. 1. Конструкция балласта**

В качестве балласта предлагается применение специальной системы малоразмерных грузов одинакового размера. Конструктивно они могут представлять собой разрезанные на небольшие части прокатные профили, имеющиеся в наличии на производстве. Размер таких элементов балласта, а значит и их масса, оказываются довольно близкими, что облегчает в дальнейшем работу с ними. Из таких балластных элементов, уложенных рядами в имеющиеся в несущей раме электровоза конструктивные полости, формируются две балластные части, ориентированные вдоль бортов машины. При этом получается конструктивная схема размещения балласта, приведенная на рис. 2.

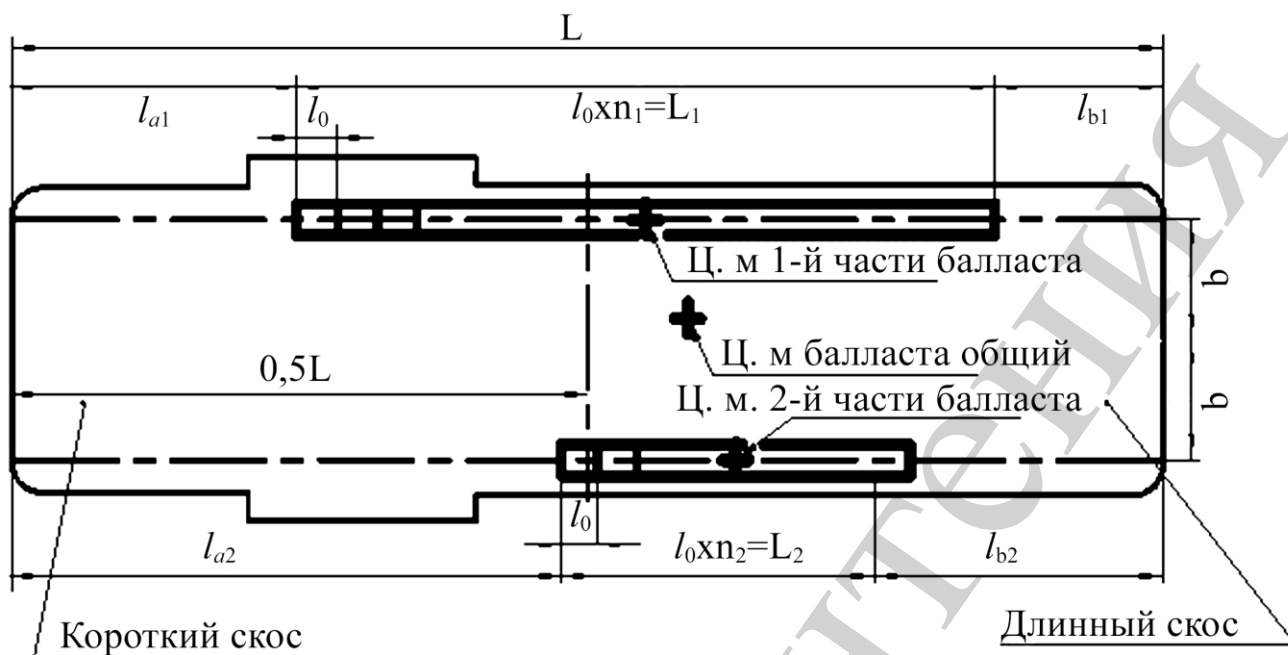


Рис. 2. Конструктивная схема размещения балласта

Для определения геометрических размеров и схемы расположения каждой из частей такого балласта по отношению к элементам электровоза выполняется специальный аналитический расчет. Использование подобного расчета предполагает только лишь однократное начальное взвешивание машины, в результате которого устанавливается фактическая ее разбалансировка. Сам расчет позволяет получить так называемую балластную карту, согласно которой может быть в короткие сроки и достаточно точно выполнена укладка балласта и произведена таким образом балансировка электровоза.

#### 4. 2. Система обозначений

Для выполнения расчета будем использовать правостороннюю декартовую систему координат  $xOy$ , с началом (т.  $O$ ) в геометрическом центре рамы кузова (рис. 3, 4). При этом продольная ось  $Ox$  ориентирована параллельно продольной оси электровоза, поперечная ось  $Oy$  – перпендикулярно продольной оси электровоза. Ось  $Oz$  ориентирована вертикально по отношению к горизонтальной плоскости несущей рамы электровоза. Геометрический центр рамы кузова электровоза (т.  $O$ ) предполагается расположенным на одной вертикальной оси с геометрическим центром его колесной базы.

В дальнейшем изложении используются ряд специальных буквенно-цифровых обозначений, расшифровка и пояснения которых приведены ниже. Для удобства использования условные обозначения объединены в три группы: геометрические обозначения, координатные обозначения и массовые обозначения.

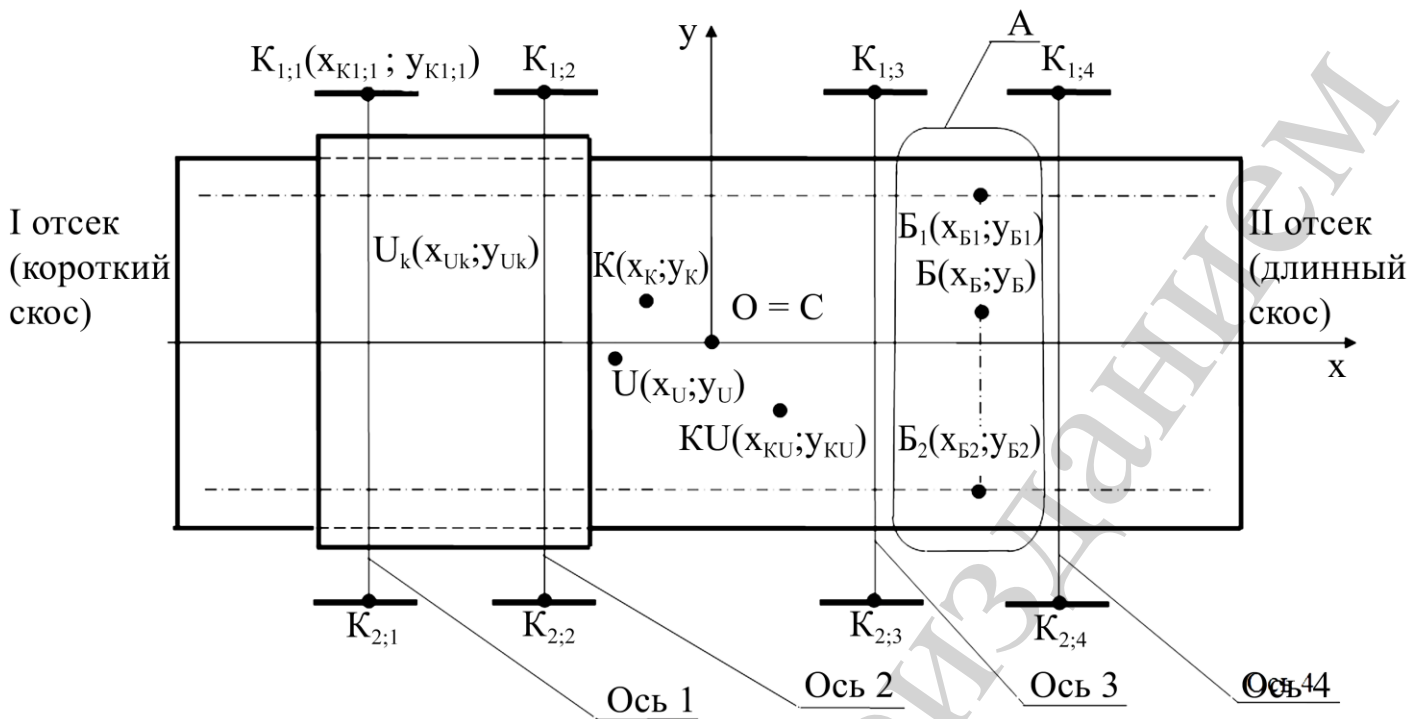


Рис. 3. Основные координатные обозначения

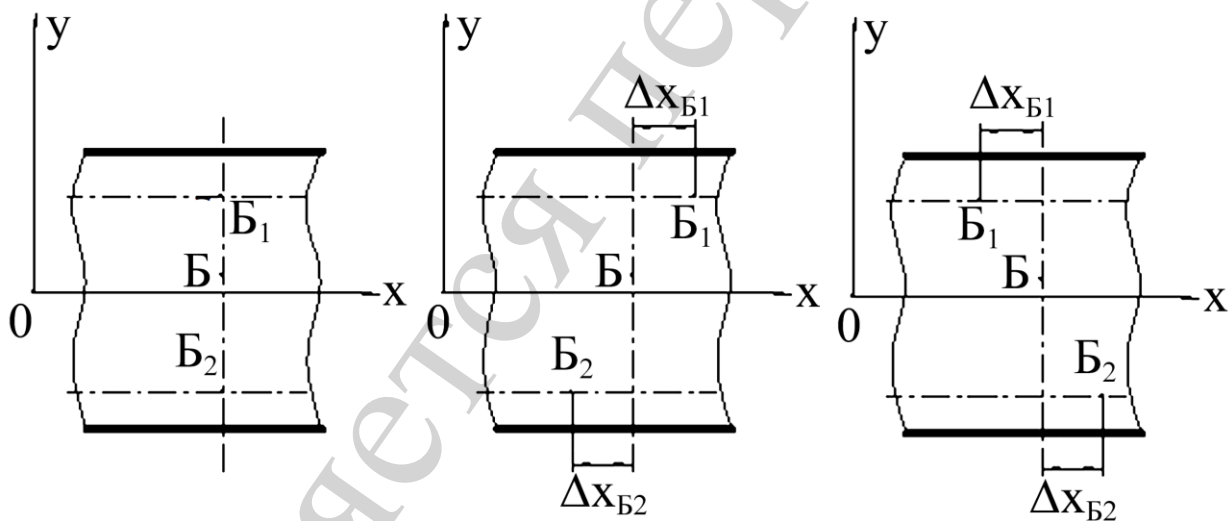


Рис. 4. Расположение центров масс частей балласта

1) Геометрические обозначения:

$b$  – поперечное расстояние от продольной плоскости симметрии рамы кузова до центров масс первой и второй частей балласта;

$l_0$  – длина одного груза, составляющего балласт;

$l_{a1}$  – продольное расстояние от края короткого скоса электровоза до начала первой части балласта;

$l_{b1}$  – продольное расстояние от конца первой части балласта до длинного скоса электровоза;

$l_{a2}$  – продольное расстояние от края короткого скоса электровоза до начала второй части балласта;

$l_{b2}$  – продольное расстояние от конца второй части балласта до длинного скоса электровоза;

$n_1$  – количество грузов, составляющих первую часть балласта;

$n_2$  – количество грузов, составляющих вторую часть балласта;

$n_{\square}$  – общее количество грузов, составляющих балласт электровоза;

$L$  – длина рамы кузова электровоза;

$L_1$  – суммарная длина первой части балласта;

$L_2$  – суммарная длина второй части балласта.

2) Координатные обозначения:

т.  $O$  – геометрический центр электровоза;

т.  $B$  – центр масс балласта;

т.  $K$  – центр масс электровоза, взвешенного с неустановленными частями и без балласта;

т.  $U$  – центр масс частей электровоза, не установленных при его взвешивании;

т.  $U_k$  – центр масс  $k$ -ой части электровоза, не установленной при его взвешивании;

т.  $KU$  – центр масс полностью укомплектованного электровоза без балласта;

т.  $C$  – центр масс полностью укомплектованного электровоза с балластом;

тт.  $K_{i;j}$  – точки контакта колес с рельсами, где  $i=1; 2$  – немой индекс стороны электровоза (1 – сторона, расположенная над осью  $Ox$ ; 2 – сторона, расположенная под осью  $Ox$ ),  $j=1; 2; 3; 4$  – номер оси колесной пары (нумерация принята слева направо);

тт.  $B_i$  – центр масс  $i$ -й части балласта, установленной по  $i$ -ой стороне (принятое наименование частей балласта:  $i=1$  – первая,  $i=2$  – вторая);

$x_K, x_{K_{i;j}}, x_U, x_{U_k}, x_{KU}, x_B, x_{B_1}, x_{B_2}$  – координаты  $x$  соответствующих точек, описанных выше (причем,  $y_{B_1} = -y_{B_2} = b$ );

$y_K, y_{K_{i;j}}, y_U, y_{U_k}, y_{KU}, y_B, y_{B_1}, y_{B_2}$  – координаты  $y$  соответствующих точек, описанных выше (причем,  $y_{B_1} = -y_{B_2} = b$ );

$\Delta x_{B_1}, \Delta x_{B_2}$  – смещения по оси  $Ox$  точек  $B_1, B_2$  относительно точки  $B$  ( $\Delta x_{B_1}, \Delta x_{B_2} > 0$ , когда они по направлению с осью  $Ox$  совпадают;  $\Delta x_{B_1}, \Delta x_{B_2} < 0$  – направлены противоположно).

3) Массовые обозначения:

$M_K$  – суммарная масса поколесного взвешивания электровоза;

$M_U$  – суммарная масса неустановленных частей электровоза;

$M$  – масса полностью укомплектованного электровоза с балластом;

$m_{K_{i;j}}$  – массы поколесных нагрузок;

$m_{\square}$  – масса балласта;

$m_0$  – усредненная масса отдельного груза для набора балласта;

$m_1$  – массы первой части балласта;

$m_2$  – массы второй части балласта.

### 4. 3. Исходные параметры

В качестве исходных данных для обоснования схемы расположения балласта необходимо выполнить предварительное взвешивание электровоза, в результате которого устанавливается весовая нагрузка на каждое колесо (в дальнейшем – поколесная нагрузка). В качестве дополнительных исходных параметров, при необходимости, следует использовать сведения о массах и координатах центров масс (точки расположения) элементов конструкции электровоза, не установленных на момент взвешивания. При этом указываются все имеющиеся фактические отклонения в расположении и массе элементов конструкции электровоза, имеющие место для конкретной машины. Подготовленные таким образом данные удобно представлять в табличной форме.

В соответствии с технической документацией на электровоз принимают длину рамы кузова  $L$ , поперечное расстояние от продольной плоскости симметрии рамы кузова до центров масс первой и второй частей балласта  $b$ . На основе конструктивных соображений (например, для обеспечения надежной фиксации частей балласта относительно рамы кузова и пр.) определяют необходимое минимальное расстояние от торца балласта до торца рамы кузова  $l_{\min}$ . Следует, также, выполнить специальное взвешивание грузов, необходимых для набора балласта электровоза. По его результатам определяют среднее значение массы одного груза  $m_0$  (среднее арифметическое). Отдельно следует выполнить специальное измерение грузов, необходимых для набора балласта электровоза. По его результатам определяют среднее значение длины одного груза  $l_0$  (среднее арифметическое).

### 5. Результаты исследований по разработке аналитического метода составления балластной карты

Все параметры балласта следует определять для полностью укомплектованного электровоза таким образом, чтобы выполнялось условие (1):

$$M_{\text{сц мин}}^{\text{н}} \leq M \leq M_{\text{сц макс}}^{\text{н}} \quad (1)$$

При этом балласт должен обеспечивать статическое уравнивание электровоза, чему соответствуют совмещение точек  $O$  с  $C$  (рис. 3). Это является определяющим условием расчета.

Сам расчет параметров балласта выполняется в два этапа. Основной задачей первого этапа является определение требуемой массы балласта и его отдельных частей для уравнивания электровоза. На этом этапе определяются следующие параметры:

- масса первой части балласта  $m_1$ ;
- масса второй части балласта  $m_2$ ;
- требуемое количество грузов  $n_1$  для набора первой части балласта;
- требуемое количество грузов  $n_2$  для набора второй части балласта.

Основной задачей второго этапа является разработка конструктивных схем размещения балласта и его отдельных частей в раме электровоза. На этом этапе определяются следующие параметры:

- суммарная длина  $L_1$  первой части балласта;
- суммарная длина  $L_2$  второй части балласта;
- продольные размеры, определяющие расположение первой части балласта  $l_{a1}$  и  $l_{b1}$ ;
- продольные размеры, определяющие расположение второй части балласта  $l_{a2}$  и  $l_{b2}$ .

Заметим также, что каждый этап расчета выполняется по три раза. При этом рассматриваются три случая расчета – для номинальной массы электровоза, максимально допустимой массы электровоза и минимально допустимой массы электровоза.

### 5. 1. Первый этап

Расчет параметров балласта электровоза следует начинать с определения необходимой суммарной массы балласта согласно выражению (2), где в качестве массы  $M^H$  принимаются нормативные значения масс электровоза:

$$m_{\Sigma} = M^H - M_K - M_U. \quad (2)$$

Массы  $M_K$  и  $M_U$  принимают на основе предварительного взвешивания электровоза, как это описано в предыдущем разделе.

Далее определяются статические моменты для масс поколесных нагрузок и масс неустановленных частей. Они вычисляются согласно выражениям (3) и (4) соответственно:

$$S_{xKi,j} = x_{Ki,j} \cdot m_{i,j}; \quad S_{yKi,j} = y_{Ki,j} \cdot m_{i,j}, \quad (3)$$

$$S_{xU} = x_k \cdot m_k; \quad S_{yU} = y_k \cdot m_k. \quad (4)$$

Теперь определяются необходимые массы первой и второй частей балласта согласно выражениям (5) и (6) соответственно:

$$m_1 = 0,5[m_{\Sigma} - (S_{yK} + S_{yU})/b], \quad (5)$$

$$m_2 = 0,5[m_{\Sigma} + (S_{yK} + S_{yU})/b]. \quad (6)$$

Требуемое количество грузов для набора необходимой массы обеих частей балласта рассчитывается согласно выражениям (7), (8) соответственно:

$$n_1 = m_1/m_0, \quad (7)$$

$$n_2 = m_2/m_0. \quad (8)$$

Полученное таким образом требуемое количество грузов округляют до целых значений по следующим правилам:

– для минимально допустимой массы электровоза округление выполняют до ближайшего большего целого значения;

– для номинальной массы электровоза округление выполняют по математическим правилам (в зависимости от значения цифры десятичного разряда);

– для максимально допустимой массы электровоза округление выполняют до ближайшего меньшего целого значения.

Далее уточняют массы первой и второй частей балласта согласно выражениям (9), (10) соответственно:

$$m_1 = n_1 \cdot m_0, \quad (9)$$

$$m_2 = n_2 \cdot m_0. \quad (10)$$

При этом в качестве величин  $n_1$  и  $n_2$  в этих выражениях используют уже округленные значения.

Массу балласта электровоза уточняют согласно выражению (11), а массу полностью укомплектованного электровоза с балластом согласно выражению (12):

$$m_{\Sigma} = m_1 + m_2, \quad (11)$$

$$M = M_K + M_U + m_{\Sigma}. \quad (12)$$

Уточненную массу полностью укомплектованного электровоза с балластом проверяют согласно выражению (1) для двух крайних случаев – для максимально допустимой массы электровоза и минимально допустимой массы электровоза.

## 5. 2. Второй этап

Вычисляют продольную координату расположения центра тяжести балласта  $x_B$  согласно выражению (13):

$$x_B = -(S_{xK} + S_{xU}) / m_{\Sigma}. \quad (13)$$

В этом выражении используют уточненную массу балласта, определенную на первом этапе расчета.

Затем необходимо рассчитать суммарные длины первой и второй частей балласта (рис. 3) согласно выражениям (14), (15):

$$L_1 = l_0 \cdot n_1, \quad (14)$$

$$L_2 = l_0 \cdot n_2. \quad (15)$$

Реальное расположение обеих частей балласта в продольном направлении электровоза относительно полученного центра тяжести балласта (координата  $x_B$ ) может быть реализовано бесконечным количеством вариантов. Основным вариантом при этом следует считать такой вариант, когда центры масс обеих частей балласта находятся на одной поперечной линии, проходящей через центр масс балласта ( $\Delta x_{B1} = \Delta x_{B2} = 0$  – рис. 4). Определение необходимых продольных координирующих размеров в этом случае выполняют следующим образом.

Вычисляются размеры, определяющие расположение первой части балласта по длине рамы кузова, согласно выражениям (16), (17):

$$l_{a1} = 0,5 \cdot L + x_B - 0,5 \cdot L_1, \quad (16)$$

$$l_{b1} = L - L_1 - l_{a1}. \quad (17)$$

Вычисляются размеры, определяющие расположение второй части балласта по длине рамы кузова согласно выражениям (18), (19):

$$l_{a2} = 0,5 \cdot L + x_B - 0,5 \cdot L_2, \quad (18)$$

$$l_{b2} = L - L_2 - l_{a2}. \quad (19)$$

Все полученные таким образом значения размеров  $l_{a1}$ ,  $l_{b1}$ ,  $l_{a2}$  и  $l_{b2}$  сравнивают с принятым в исходных данных минимальным расстоянием от торца балласта до торца рамы кузова  $l_{\min}$ . Если какой-либо из этих размеров оказывается менее размера  $l_{\min}$ , то данный вариант для принятого нормативного значения массы электровоза конструктивно реализован быть не может (недостаточно места для расположения балласта в раме кузова).

В этом случае необходимо выполнить обратный перерасчет всех параметров по расположению балласта электровоза, получив иное значение массы полностью укомплектованного электровоза с балластом.

В качестве дополнительных вариантов по расположению балласта электровоза следует считать случаи, когда каждая из частей балласта максимально смещена до торца рамы кузова. При этом необходимо выделять два случая, от которых зависят принятые варианты расположения балласта:

1) если полученная ранее координата центра масс балласта положительна ( $x_B > 0$ ), то части балласта располагают по следующим двум вариантам:

– дополнительный вариант № 1 – центр масс первой части балласта смещен максимально вправо, а второй части балласта смещен максимально влево относительно поперечной линии, проходящей через центр масс балласта ( $\Delta x_{B1} > 0$  и  $\Delta x_{B2} < 0$ );

– дополнительный вариант № 2 – центр тяжести второй части балласта смещен максимально вправо, а первой части балласта смещен максимально влево относительно поперечной линии, проходящей через центр тяжести балласта ( $\Delta x_{B2} > 0$  и  $\Delta x_{B1} < 0$ ).

2) если полученная ранее координата центра масс балласта отрицательна ( $x_B < 0$ ), то части балласта располагают по следующим двум вариантам:

– дополнительный вариант № 3 – центр масс первой части балласта смещен максимально влево, а второй части балласта смещен максимально вправо относительно поперечной линии, проходящей через центр масс балласта ( $\Delta x_{B1} < 0$  и  $\Delta x_{B2} > 0$ );

– дополнительный вариант № 4 – центр тяжести второй части балласта смещен максимально влево, а первой части балласта смещен максимально вправо относительно поперечной линии, проходящей через центр тяжести балласта ( $\Delta x_{B2} < 0$  и  $\Delta x_{B1} > 0$ ).

Каждый из указанных вариантов рассчитывается для трех стандартных случаев – для номинальной массы электровоза, максимально допустимой массы электровоза и минимально допустимой массы электровоза. В связи с этим может быть выявлена ситуация, когда для различных случаев расчет следует выполнять по различным вариантам, согласно приведенным в табл. 1 выражениям.

Таблица 1

Последовательность расчета для дополнительных вариантов расположения балласта

Расчетная операция	Расчетные выражения для дополнительного варианта			
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
Размеры, определяющие расположение части балласта по длине рамы кузова	$l_{b1} = l_{\min},$ $l_{a1} = L - L_1 - l_{b1}$	$l_{b2} = l_{\min},$ $l_{a2} = L - L_2 - l_{b2}$	$l_{a1} = l_{\min},$ $l_{b1} = L - L_1 - l_{a1}$	$l_{a2} = l_{\min},$ $l_{b2} = L - L_2 - l_{a2}$
Координата центра масс части балласта	$x_B = 0,5 \cdot L - l_{b1} - 0,5 \cdot L_1$	$x_{B2} = 0,5 \cdot L - l_{b2} - 0,5 \cdot L_2$	$x_{B1} = 0,5 \cdot L - l_{a1} - 0,5 \cdot L_1$	$x_{B2} = 0,5 \cdot L - l_{a2} - 0,5 \cdot L_2$
Продольные смещения центров масс частей балласта по отношению к центру масс электровоза	$\Delta x_{B1} = x_{B1} - x_B,$ $\Delta x_{B2} = -$ $\Delta x_{B1} \cdot m_1 / m_2$	$\Delta x_{B2} = x_{B2} - x_B,$ $\Delta x_{B1} = -$ $\Delta x_{B2} \cdot m_2 / m_1$	$\Delta x_{B1} = x_{B1} - x_B,$ $\Delta x_{B2} = -$ $\Delta x_{B1} \cdot m_1 / m_2$	$\Delta x_{B2} = x_{B2} - x_B,$ $\Delta x_{B1} = -$ $\Delta x_{B2} \cdot m_2 / m_1$
Координата центра масс части балласта	$x_{B2} = x_B + \Delta x_{B2}$	$x_{B1} = x_B + \Delta x_{B1}$	$x_{B2} = x_B + \Delta x_{B2}$	$x_{B1} = x_B + \Delta x_{B1}$
Размеры, определяющие расположение части балласта по длине рамы кузова	$l_{b2} = 0,5 \cdot L - x_{B2} - 0,5 \cdot L_2,$ $l_{a2} = L - L_2 - l_{b2}$	$l_{b1} = 0,5 \cdot L - x_{B1} - 0,5 \cdot L_1,$ $l_{a1} = L - L_1 - l_{b1}$	$l_{a2} = 0,5 \cdot L - x_{B2} - 0,5 \cdot L_2,$ $l_{b2} = L - L_2 - l_{a2}$	$l_{a1} = 0,5 \cdot L - x_{B1} - 0,5 \cdot L_1,$ $l_{b1} = L - L_1 - l_{a1}$

Полученные таким образом значения размеров, определяющие расположение части балласта по длине рамы кузова, сравнивают с принятым в исходных данных минимальным расстоянием от торца балласта до торца рамы кузова  $l_{\min}$ . Если какой-либо из этих размеров оказывается менее размера  $l_{\min}$ , то данный вариант для принятого нормативного значения массы электровоза конструктивно реализован быть не может (недостаточно места для расположения балласта в раме кузова). В этом случае необходимо выполнить обратный перерасчет всех параметров по расположению балласта электровоза, получив иное значение массы полностью укомплектованного электровоза с балластом.

Общее количество грузов, составляющих балласт электровоза, дополнительно рассчитывается согласно выражению (20):

$$n_{\square} = n_1 + n_2. \quad (20)$$

Окончательно полученное количество элементов балласта передается на производственный участок, на котором выполняются ремонтно-балансировочные работы электровоза. Также оно заносится в балластную карту машины и сохраняется до следующего периодического обслуживания или ремонта машины.

## 6. Обсуждение результатов разработки аналитического метода составления балластной карты

В качестве иллюстрации практического использования изложенного выше аналитического метода составления балластной карты электровоза управления тягового агрегата ПЭ2У приведем расчеты, выполненные для машины с серийным номером 119, находившейся в ремонте на ДЭВЗе в 2011 г.

Результаты поколесного взвешивания электровоза приведены в табл. 2, а сведения о неустановленных частях электровоза на момент взвешивания приведены в табл. 3.

Таблица 2  
Результаты поколесного взвешивания

Точки приложения нагрузок (рис. 2)	Координаты, м		Нагрузки, т
	$x_{i;j}$	$y_{i;j}$	
K <sub>1;1</sub>	-6,565	0,76	12,98
K <sub>1;2</sub>	-3,815	0,76	13,04
K <sub>1;3</sub>	3,815	0,76	12,00
K <sub>1;4</sub>	6,565	0,76	12,52
K <sub>2;1</sub>	-6,565	-0,76	13,16
K <sub>2;2</sub>	-3,815	-0,76	12,83
K <sub>2;3</sub>	3,815	-0,76	11,93
K <sub>2;4</sub>	6,565	-0,76	12,99
Сумма	—	—	$M_K=101,45$

В табл. 2, 3 сумма берется только по последней колонке, координаты не суммируются. Так заполняются эти таблицы в практике ремонта машин.

Длина рамы кузова электровоза согласно технической документации принимается равной  $L=17968$  мм. Поперечное расстояние от продольной плоскости симметрии рамы кузова до центров масс первой и второй частей балласта согласно технической документации на электровоз принимается равным  $b=1,365$  м.

Таблица 3

Сведения о неустановленных частях

Неустановленные части	Координаты, м		Нагрузки, т
	$x_k$	$y_k$	
Песок	0	0	0,448
ЗИП	0	0	0,92
Кресло 1 с машинистом	-2,500	1,35	0,15
Кресло 2 с машинистом	-2,770	-1,35	0,15
Генератор	-7,9	0,97	0,302
Сумма	–	–	$M_U=1,97$

Необходимое минимальное расстояние от торца балласта до торца рамы кузова принято равным  $l_{\min}=200$  мм.

Среднее значение массы одного составляющего балласт груза, определенное по результатам специального взвешивания, равно  $m_0=0,18$  т. Среднее значение длины одного составляющего балласт груза, определенное по результатам специального измерения, равно  $l_0=300$  мм.

Окончательные результаты расчетов первого этапа представлены в табл. 4, а второго этапа – в табл. 5. Для каждого из рассмотренных вариантов приведены данные в трех строках, соответствующие номинальной массе электровоза, максимально допустимой массе электровоза и минимально допустимой массе электровоза. Дополнительные варианты № 3, 4 по размещению балласта в данном случае реализованы быть не могут.

Таблица 4

Результаты расчетов первого этапа

$M$	Масса, т			Количество грузов, шт.		
	$m_{\Sigma}$	$m_1$	$m_2$	$n_{\Sigma}$	$n_1$	$n_2$
116,74	13,32	6,66	6,66	74	37	37
119,98	16,56	8,28	8,28	92	46	46
123,58	20,16	10,08	10,08	112	56	56

На рис. 5 также представлен график зависимости суммарной необходимой массы балласта, а также его отдельных частей от массы полностью укомплектованного электровоза.

Таблица 5  
Результаты расчетов второго этапа

Масса, т	Размеры, мм					
	$L_1$	$L_2$	$l_{a1}$	$l_{a2}$	$l_{b1}$	$l_{b2}$
Основной вариант						
116,74	11100	11000	4539	4539	2329	2329
119,98	13800	13800	2972	2972	1196	1196
123,58	16800	16800	—	—	—	—
Дополнительный вариант № 1						
116,74	11100	11000	6668	2410	200	4458
119,98	13800	13800	3968	1976	200	2192
123,58	16800	16800	—	—	—	—
Дополнительный вариант № 2						
116,74	11100	11000	2410	6668	4458	200
119,98	13800	13800	1976	3968	2192	200
123,58	16800	16800	—	—	—	—

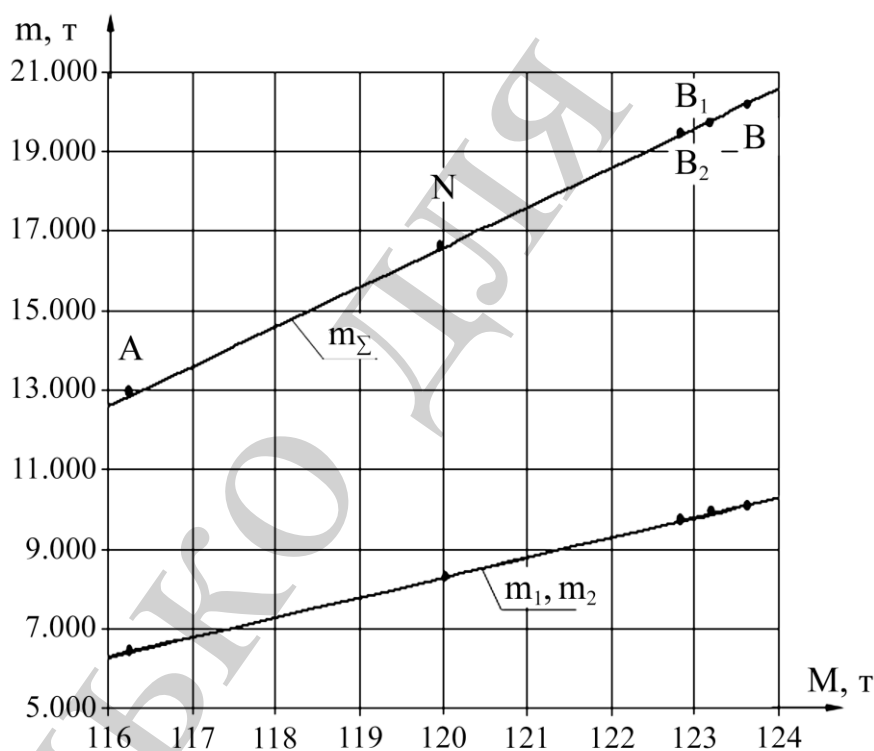


Рис. 5. Зависимость массы балласта от массы электровоза

Приведенный на рис. 5 график позволяет вычислять необходимые значения масс частей балласта для различных промежуточных случаев, которые могут иметь место в практике.

По результатам выполненного расчета и составленной на его основе балластной карты для рассмотренного электровоза управления тягового агрегата ПЭ2У была выполнена его практическая балансировка. При этом суммарная

масса балласта составила 13,32 т, распределенная вдоль двух бортов практически равномерно. В результате по данным окончательного взвешивания давление на колесные пары передних и задних осей отличалось на 1,3 %, а бортовая разбалансировка составила 0,7 %, что является довольно хорошим показателем.

Таким образом, разработанный и предлагаемый аналитический подход по составлению балластной карты электровозов управления типа ПЭ2У позволил получить практически идеальную балансировку машины с минимально необходимой массой балласта и минимальным количеством взвешиваний при этом. Имеющиеся небольшие отклонения связаны с неизбежной при расчетах погрешностью за счет округления требуемого количества грузов, формирующих балласт, до целых частей. Также определенный вклад вносят и технологические погрешности, возникающие в практике при установке самих балластных элементов и отклонением их масс от номинальных.

В качестве сферы применимости изложенного аналитического подхода следует отметить, что он ориентирован непосредственно на конструкцию электровоза управления тягового агрегата серии ПЭ2, в несущей раме которого изначально имеются специальные полости. Для электровозов тяговых агрегатов других серий предложенное конструктивно-технологическое решение требует доработки в части его увязки с конструкцией самих машин. При этом аналитический подход может быть применен без каких-либо принципиальных корректировок. Единственным ограничением будет являться возможность поколесного взвешивания самих машин, что не всегда удается выполнить в практике обслуживания.

## **7. Выводы**

1. В качестве конструктивно-технологическое решение по расположению балласта электровоза управления тягового агрегата ПЭ2У предложено применение специальной системы малоразмерных грузов одинакового размера, образующие наборные элементы балласта машины. Из таких балластных элементов, уложенных рядами в имеющиеся в несущей раме электровоза конструктивные полости, формируются две балластные части, ориентированные вдоль бортов машины.

2. Приведенный алгоритм теоретического расчета необходимого количества и массы балласта представлен в практически применимой форме в виде набора формул для конкретных практических случаев. В результате расчета формируется балластная индивидуальная балластная карта машины, содержащая информацию о расположении и конструкции балласта.

3. Предложенный подход был опробован на ряде машин электровозов управления тяговых агрегатов серии ПЭ2У в 2010–2012 гг., находящихся в это время на плановом и внеплановом обслуживании на Днепровском электровозостроительном заводе (ДЭВЗе), Украина. В результате это позволило существенно упростить и ускорить процесс балансировки машин.

Разработанные конструктивно-технологические решения по расположению балласта электровоза управления тягового агрегата ПЭ2У, а также теоре-

тический подход по его обоснованию, могут быть официально использованы в специализированной нормативной документации.

### **Благодарности**

Выражаем свою глубокую признательность и благодарность сотрудникам ДЭВЗа за долговременное сотрудничество в сфере разработки и внедрения теоретического подхода по составлению балластной карты электровоза управления тягового агрегата ПЭ2У. В особенности существенную помощь оказали: главный конструктор электровоза ДСЗ к.т.н. Гривнак А. Я. и начальник расчетно-конструкторского отдела Розенталь Г. А.

### **Литература**

1. Нормы для расчета и оценки прочности несущих элементов, динамических качеств и воздействия на путь экипажной части локомотивов железных дорог МПС РФ колеи 1520 мм. Москва: ВНИИЖТ, 1998. 145 с.
2. ТУ У 35.2-32495626-010-20. Агрегаты тяговые. Технические условия. Днепропетровск: ДЭВЗ, 2003. 48 с.
3. ГОСТ Р 55513-2013. Локомотивы. Требования к прочности и динамическим качествам. Москва: Стандартинформ, 2014. 45 с.
4. Дацун Ю. М. Оцінка рівня відповідності локомотиворемонтного виробництва // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. 2017. Вип. 3 (69). С. 23–31. doi: <https://doi.org/10.15802/stp2017/103937>
5. Liu G. R., Quek S. S. The Finite Element Method. Elsevier, 2014. 464 p. doi: <https://doi.org/10.1016/c2012-0-00779-x>
6. Wang B., Zhang Y., Chen R. J. Several Realizations of the Finite Element Software ANSYS Structural Analysis // Applied Mechanics and Materials. 2013. Vol. 442. P. 507–510. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.442.507>
7. Toreh E. H., Shahmohammadi M., Khamseh N. Kinematic and Kinetic Study of Rescue Robot by SolidWorks Software // Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology. 2013. Vol. 5, Issue 21. P. 5070–5076. doi: <https://doi.org/10.19026/rjaset.5.4399>
8. Modeling and Static Analysis of an Areogenerator Savonius Cracked by Using SolidWorks/CosmosWorks Software / Khelifi C., Ouali M., Ferroudji F., Adjilout L. // Applied Mechanics and Materials. 2013. Vol. 446-447. P. 744–750. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.446-447.744>
9. Gao H. F. The Development and Application of Parallel Computation for Structural Analysis Based on Nastran Software // Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol. 778. P. 41–45. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.778.41>
10. Kathrotiya M. Construction Stage Analysis of Flat Slab Structure with respect to Non Linear Time History Analysis using Software Aid // International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology. 2018. Vol. 6, Issue 4. P. 4833–4839. doi: <https://doi.org/10.22214/ijraset.2018.4791>

11. Vysoký R. Current Capabilities of Modal Analysis of Aircraft Propeller in ANSYS Mechanical Environment // *Advances in Military Technology*. 2017. Vol. 12, Issue 1. P. 33–47. doi: <https://doi.org/10.3849/aimt.01160>
12. Li W. M., Yan Y. Y., Xing Y. The Numerical Simulation of Punching and the Fatigue Analysis of Punch Based on ANSYS/LS-DYNA and ANSYS-Fatigue Tool // *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 904. P. 469–473. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.904.469>
13. Банніков Д. О. Використання будівельно-орієнтованого ПК SCAD для аналізу роботи машинобудівних конструкцій // *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту*. 2018. Вип. 1 (73). С. 98–111. doi: <https://doi.org/10.15802/stp2018/123406>
14. Распределение транспортных происшествий на железных дорогах Украины по категориям в зависимости от тяжести последствий / Огар А. Н., Розсоха О. В., Шаповал Г. В., Смачило Ю. В. // *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту*. 2018. Вип. 3 (75). С. 7–19. doi: <https://doi.org/10.15802/stp2018/124466>
15. Вырков С. А. Классификация железнодорожных транспортных происшествий по критерию материального ущерба // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. 2015. Вип. 1. С. 12–19.