

Ю. Герлицы, к.т.н., проф.

Е.А. Кравченко, к.т.н., доц.

В. Хаусер, к.т.н.

Жилинский университет, Словакия

Н.И. Горбунов, д.т.н., проф.

Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля

А.П. Кравченко, д.т.н., проф.

Житомирский государственный технологический университет

В.П. Ткаченко, д.т.н., проф.

С.Ю. Сапронова, д.т.н., проф.

Государственный университет инфраструктуры и технологий

Оценка и повышение тягово-цепных качеств транспортного средства на основе применения целевой функции, объединяющей электрические и механические характеристики

Проанализированы и обобщены теоретические исследования по проблеме повышения силы тяги локомотива. Сложный характер процесса взаимодействия колесной пары с рельсовой колеёй, изменение параметров экипажа в процессе эксплуатации, необходимость удовлетворения ряду противоречивых конструктивных решений и выборе из них компромиссных, требует использования эффективного критерия, который позволит оценить варианты и определить рациональные решения по достижению максимально реализуемой силы тяги для повышения эффективности и конкурентоспособности тяговой единицы. Статическое и динамическое перераспределение нагрузок от колесных пар на рельсы при реализации силы тяги, различие условий взаимодействия отдельных колесных пар с рельсами, расхождение характеристик двигателей и ряд других факторов отрицательно влияют на суммарную максимально реализуемую силу тяги. Разработан метод повышения тягово-цепных качеств на основе целевой функции для оценки резерва реализации суммарной силы тяги колесных пар локомотива с учетом комплексного подхода к результатам анализа конструктивных параметров локомотива и его эксплуатационных характеристик.

Ключевые слова: целевая функция; сцепление, тяговые качества; перераспределение вертикальных нагрузок; характеристика тягового электродвигателя; селективный подбор ТЭД.

Постановка проблемы. Железнодорожный транспорт занимает ведущее место в функционировании и развитии транспортной системы Украины. От реализуемой силы тяги зависит эффективность эксплуатации локомотива в целом. Достижение максимальных тяговых усилий сложная задача, вызванная влиянием на силу тяги большого многообразия проектных и эксплуатационных факторов. Статическое и динамическое перераспределение нагрузок от колесных пар на рельсы при реализации силы тяги, различие условий взаимодействия отдельных колесных пар с рельсами, расхождение характеристик двигателей и ряд других факторов отрицательно влияют на суммарную максимально реализуемую силу тяги. Взаимосвязанный и взаимозависимый характер изменяемых в процессе эксплуатации параметров системы «экипаж-путь» предопределяет необходимость комплексного подхода к анализу тягово-цепных возможностей при его проектировании и дальнейшем практическом использовании.

Таким образом, разработка мероприятий по достижению максимально возможной силы тяги, реализуемой отдельной колесной парой является актуальным вопросом повышения тяговых качеств локомотивов.

Анализ последних исследований и публикаций. Значительное количество проведенных в отрасли исследовательских работ по созданию новой высокоэффективной железнодорожной техники, и, в частности тягового подвижного состава, окончательно не решили задачу проектирования перспективных конструкций локомотивов.

Сложный характер процесса взаимодействия колесной пары с рельсовой колеёй, изменение параметров экипажа в процессе эксплуатации, необходимость удовлетворения ряду противоречивых конструктивных решений и выборе из них компромиссных, требует использования эффективного критерия, который позволит оценить варианты и определить рациональные решения по достижению максимально реализуемой силы тяги для повышения эффективности и конкурентоспособности тяговой единицы.

Тяговые качества локомотива оцениваются коэффициентом использования сцепного веса η , коэффициентом сцепления $\psi_{сч}$, силой тяги на автосцепке F и др.

Коэффициент использования сцепного веса η [3, 4, 5, 7, 10, 17] определяется как отношение наименьшей статической нагрузки P_{lim} любой его колесной пары на путь при трогании с места и движении в режиме тяги к средней ее величине P . Данный критерий отличается простотой расчета и измерений. Однако он не учитывает динамический характер изменения вертикальной нагрузки, крутящего момента, коэффициента сцепления в контакте колеса с рельсом вследствие кинематики, динамики движения и фрикционных условий.

Обычно при оценке влияния конструкции экипажа на коэффициент использования сцепного веса предполагается, что статическая нагрузка и развиваемая сила тяги для всех колесных пар стремится к равным значениям [9, 20]. Влияние динамического фактора исключается. В этом случае для локомотивов с индивидуальным приводом колесных пар статический коэффициент использования сцепного веса выражается зависимостью [17]

$$\eta = \frac{1}{1 + k\psi_o}, \quad (1)$$

где k – коэффициент разгрузки колесной пары при тяговом усилии в условиях движения с ограничением силы тяги по сцеплению; ψ_o – коэффициент сцепления между колесной парой и рельсами.

Этот критерий имеет те же недостатки, что и предыдущий. Однако здесь можно учесть влияние динамических факторов на процесс движения локомотива. В то же время, он сложнее, так как кроме определения вертикальных сил необходимо также измерять и силу тяги колесной пары.

Распространенным критерием оценки тяговых качеств является реализуемый коэффициент сцепления $\psi_{сч}$ [2, 9, 11, 12, 19]. Преимуществом такого способа оценки является возможность учета с помощью теоретико-вероятностных методов всего многообразия факторов, влияющих на реализацию силы тяги.

В ряде работ [10, 11] в качестве критерия оценки тяговых качеств локомотивов была использована сила тяги на автосцепке F , которую локомотив может реализовать в течение длительного промежутка времени без боксования. В данном случае сила тяги локомотива оценивается прямо и непосредственно.

Используется такой показатель, как отношение площади зоны сцепления к площади зоны скольжения пятна контакта [1, 19]. При таком подходе для оценки тяговых качеств надо решать контактную задачу взаимодействия колеса и рельса, что связано с определенными сложностями.

Для оценки тяговых качеств в работах [8, 15] применяется коэффициент тяги, определяемый как отношение действительной силы тяги к сцепному весу локомотива. К недостаткам данного критерия следует отнести тот факт, что при разных режимах движения сила тяги локомотива является величиной переменной, поэтому коэффициент тяги должен зависеть от режима движения, а также фрикционных условий сцепления, состояния пути и т.п.

Рассмотренные выше критерии не позволяют оценить взаимозависимость неравномерности распределения вращающих моментов ТЭД, коэффициентов сцепления и вертикальных нагрузок по колесным парам локомотива и, соответственно, возникает задача разработки эффективного технического предложения по повышению тяговых качеств локомотива.

Одним из способов решения задачи повышения тягово-сцепных качеств считается создание устройств и конструкций ходовых частей, позволяющих выравнять статические нагрузки от колесных пар на рельсы за счет компенсации их перераспределения в режиме тяги. При этом считается, что локомотив, имеющий на всех режимах движения равные статические нагрузки от колесных пар на рельсовый путь, обладает наилучшими тяговыми качествами. Существует целое направление по повышению коэффициента использования сцепного веса, который характеризует степень неравномерности этих нагрузок. На самом деле равенство нагрузок от колесных пар на рельсы не обеспечивает экстремума возможной силы тяги, реализуемой локомотивом, что вызвано отличием вращающих моментов и коэффициентов сцепления. Поэтому при проектировании локомотива необходимо учитывать все три фактора (нагрузку от колесной пары на рельс, вращающий момент и коэффициент сцепления каждой колесной пары) и создавать такие технические решения, которые позволяют реализовать резерв тяговых качеств, тем самым обеспечивать энергетическую эффективность работы локомотива.

С точки зрения использования сил сцепления, первая колесная пара находится в наихудших условиях по сцеплению, поскольку имеет наибольшее проскальзывание (рис. 1), которое в значительной мере влияет на силовое взаимодействие, износ колес и рельсов и безопасность движения подвижного состава. Скольжение от 1-й к i -й колесной паре уменьшается; при этом сила тяги первой колесной пары наименьшая [18].

Это приводит к снижению силы тяги локомотива. Обеспечение максимальной силы тяги реализуемой локомотивом достигается за счет реализации каждой колесной парой максимальной силы

сцепления. Достижение требуемого условия возможно при стремлении максимального скольжения к минимуму на всех колесных парах (рис. 2).

Снижение величины скольжения может быть обеспечено правильным перераспределением нагрузок от колесных пар на рельсы и повышение сцепления за счет применения абразивного материала в контакте колеса с рельсом, а также за счет регулирования момента ТЭД.

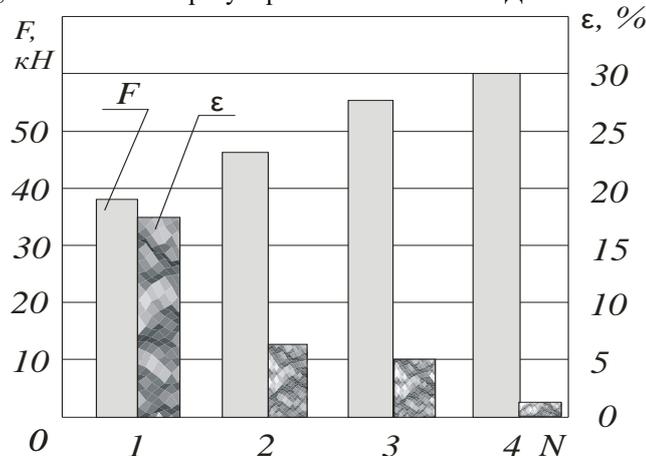


Рис. 1. Характеристика разгона локомотива: F – сила тяги колесной пары; ε – скольжение

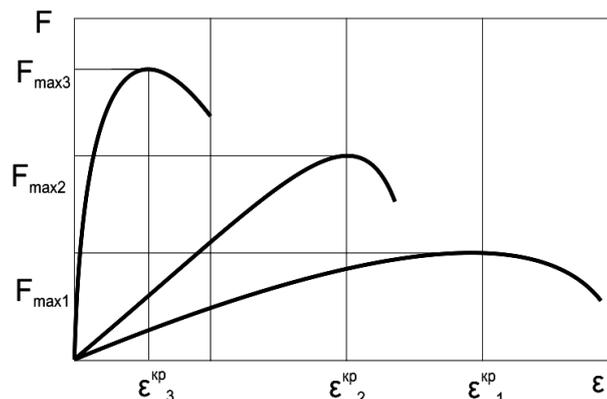


Рис. 2. Распределение проскальзывания

Изложение основного материала. Для оценки тяговых качеств в работе составлена целевая функция, в которой учтены основные факторы, влияющие на тяговые качества. Эта функция позволяет оценивать эффективность применяемых технических решений по повышению тягово-сцепных качеств [11]. Физический смысл функции заключается в стремлении действительной силы тяги, ограниченной характеристиками тяговых электродвигателей к максимально возможной по сцеплению для данной конструкции локомотива и условий его работы. При этом величина критического скольжения по колесным парам должна стремиться к минимуму.

$$\zeta = \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^n \frac{F_{\partial i}}{F_{\max i}} \right] = \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^n \frac{2M_i^{ep}(\Phi, I, L, R, \Delta_M) \mu \eta_p}{DP_i^g(\eta_{zi} \eta_{ni}) \psi_i^{\max}(\varepsilon_i^{kp})} \right] \xrightarrow{\varepsilon_1^{kp} = \varepsilon_2^{kp} = \dots = \varepsilon_n^{kp} \rightarrow \min} 1; \quad (2)$$

$$F_{\partial i} \leq F_{\max i}$$

где n – количество осей локомотива; F_i^{∂} – действительная сила тяги, реализуемая i -й колесной парой

$$F_i^{\partial} = \frac{2M_i^{ep}(n, \Phi, I, L, R, \Delta_M) \mu}{D} \eta_p; \quad (3)$$

где μ – передаточное число тягового редуктора, D – диаметр колеса по кругу катания, η_p – КПД тягового редуктора; $M_i^{ep}(\Phi, I, L, R, t_M)$ – вращающий момент ТЭД отдельной колесной пары, который зависит от частота вращения n , магнитного потока Φ , силы тока I тягового электродвигателя (ТЭД), длины L и сопротивления R токопроводов, Δ_M – отклонение вращающего момента тягового электродвигателя от номинального значения в пределах допуска на его отклонение согласно [6]; F_i^{\max} – максимально возможная сила тяги отдельной колесной пары по сцеплению:

$$F_i^{\max} = P_i^e (\eta_{ei} \eta_{ni}) \psi_i^{\max} (\varepsilon_i^{kp}); \quad (4)$$

где P_i^e – вертикальная нагрузка на ось, которая зависит от статического и динамического перераспределения нагрузок, вызванные проектными параметрами локомотива η_{ni} и эксплуатационными факторами η_{ei} [4]; ψ_i^{\max} – максимальный коэффициент сцепления, достигаемый при критическом скольжении ε_i^{kp} .

При проектировании локомотивов полагают, что статические нагрузки от колесных пар на рельсы одинаковые. В действительности они имеют отклонения от расчетных значений. Это связано с разными конструктивными и эксплуатационными факторами, исчерпывающий анализ которых приведен в научных работах [3, 4, 5, 7, 17, 19, 20]. В режиме реализации силы тяги наиболее неблагоприятные условия для перехода в боксование создаются у той колесной пары, которая имеет наименьшую нагрузку на рельсы при прочих равных условиях.

Согласно целевой функции (2) оценено влияние обезгруживания передней колесной пары и дальнейшее перераспределение нагрузок по колесным парам от действия силы тяги в момент трогания с места на тяговые качества маневрового тепловоза ТЭМ103. На рисунке 1 представлено распределение максимальной силы тяги по колесным парам локомотива с учетом перераспределения нагрузок. Значение целевой функции составляет $C = 0,88$, а, следовательно, перераспределение нагрузок от колесных пар на рельсы снижает тяговые возможности локомотива на 12 %.

Перераспределение вертикальных нагрузок негативно влияет не только на тяговые качества локомотива, но и на сцепные свойства. Это видно на примере разгона локомотива – проскальзывание уменьшается от 1-й к i -й колесной паре (табл. 1) [18]. Кроме перераспределения вертикальных нагрузок сцепные качества зависят от величины коэффициента сцепления, на который влияют разные факторы: значение и характер вертикальных, поперечных и продольных сил в зоне контакта, геометрия и материал колеса и рельса, состояние поверхности контактирующих тел, кинематика колесной пары, уровень и структура загрязнений, температура в контакте, скорость движения, разность вращающихся моментов по колесным парам локомотива и другие. Обычно при расчете сцепных качеств локомотива влияние этих факторов, кроме вертикальной средней нагрузки, для всех колесных пар экипажа оценивается одинаковыми коэффициентами. В действительности условия контактирования колес с рельсами различны и зависят от места колесной пары в составе экипажа.

Таблица 1

Распределение силы тяги и скольжения колеса с рельсом по колесным парам при разгоне локомотива

Номер колесной пары N	1	2	3	4
Сила тяги F , кН	38	46	57	60
Скольжение ε , %	34	12	10	4

Согласно исследований авторов [2] существует эффект очистки рельса впереди идущими колесами. При этом коэффициент сцепления первой колесной пары может быть на 6–22 % (для рельсов политых водой) и на 20–46 % (для замасленных рельсов) меньше, чем на последней колесной паре. С учетом вышесказанного определены значения максимальной силы тяги F_{2max} (рис. 3) по сцеплению для маневрового тепловоза ТЭМ103. Значение целевой функции при этом составило $C = 0,78$. Полученные результаты свидетельствуют о том, что при проектировании и дальнейшей эксплуатации локомотива необходимо не выравнять, а перераспределять нагрузки от колесных пар на рельсы.

Для этого на ТЭМ103 применяют догружающие устройства в связи кузова с тележками для перераспределения нагрузок в режиме реализации максимальных тяговых усилий для устранения явления опрокидывания [3]. Для данного локомотива применение догружающих устройств позволяет повысить значение целевой функции с $C=0,78$ до $C = 0,81$, а значит повысить его тяговые качества на 3,7 %.

В работах [10, 16, 17] особо отмечено негативное влияние различия вращающихся моментов тяговых электродвигателей (ТЭД) на тяговые свойства локомотива, а также на надежность его работы и срок службы. В соответствии с действующим стандартом [6], при изготовлении тяговых электрических машин, допуск на отклонение вращающего момента находится в пределах ± 5 %. Следовательно, установленные на локомотиве тяговые электродвигатели практически всегда будут в той или иной мере отличаться по своим характеристикам. Это вызывает различные усилия тяги двигателей и ухудшает условия работы локомотива. Сочетание этих явлений может увеличить возможность возникновения боксования, что негативно влияет не только на тяговые качества локомотива, а также повышает расход песка, износ рельс и бандажей, расход электроэнергии на тягу поездов.

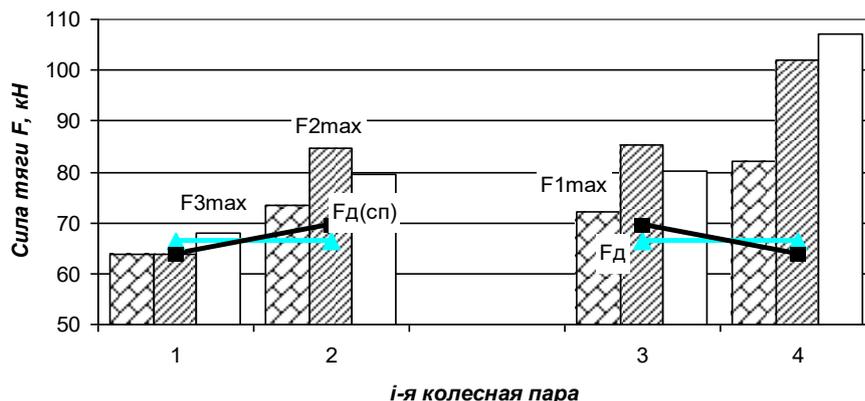


Рис. 3. Распределение действительной и максимальной силы тяги по колесным парам маневрового тепловоза ТЭМ103:

F_{1max} – максимальная сила тяги на i -й колесной паре с учетом перераспределения вертикальных нагрузок при реализации максимальной силы тяги (при трогании тепловоза с места);
 F_{2max} – максимальная сила тяги на i -й колесной паре с учетом перераспределения вертикальных нагрузок при реализации максимальной силы тяги (при трогании тепловоза с места) и эффекта очистки рельса впереди идущими колесами; F_{3max} – максимальная сила тяги на i -й колесной паре с учетом перераспределения вертикальных нагрузок при реализации максимальной силы тяги (при трогании тепловоза с места) и эффекта очистки рельса впереди идущими колесами с включенным догружающим устройством; F_d – действительная сила тяги i -й колесной пары;
 $F_{d(cn)}$ – действительная сила тяги i -й колесной пары при селективном подборе характеристик ТЭД по колесным парам локомотива

Для обеспечения максимальной силы тяги на практике применяют поосное регулирование силы тяги [14]. При этом происходит выравнивание тягового усилия по колесным парам в зависимости от фактической вертикальной нагрузки и боксования колесных пар. Однако в тяжелых режимах движения (трогание с места, движение по затяжным подъемам, спускам и перевалам и пр.) выравнивание нагрузок приводит к тому, что наименее нагруженная колесная пара пытается реализовать те же усилия, что и наиболее нагруженная. Как правило, подобное «выравнивание» нагрузок только провоцирует появление избыточного скольжения у наименее нагруженных колесных пар, что не позволяет использовать все сцепные свойства локомотива в полной мере. Задавшись целью полностью исключить буксование как явление – значит заведомо недоиспользовать части тяговой мощности, в особенности при плохих фрикционных свойствах рельсов. В работе [13] предложено не выравнивать электрические нагрузки ТЭД, а, наоборот, распределять их по тяговым двигателям с учетом реальных условий сцепления под каждой колесной парой.

Поосное регулирование ТЭД позволяет сбросить электрическую нагрузку на лимитирующей колесной паре, соответственно суммарная сила тяги снижается. Предлагается производить селективный подбор характеристик ТЭД по колесным парам локомотива с учетом разницы их вращающих моментов, а также перераспределения нагрузок от колесных пар на рельсы и разности условий по сцеплению отдельных колесных пар. При этом должно выполняться условие:

$$M_{lim} < M_i, \quad (5)$$

где M_{lim} – вращающий момент ТЭД лимитирующей колесной пары; M_i – вращающий момент i -й колесной пары.

Эффективность дифференцированного подбора рассмотрена в таблицах 2 и 3, для магистрального тепловоза 2ТЭ116 и маневрового – ТЭМ103 (рис. 4). Данные представлены в таблицах для каждой колесной пары; как для наихудшего, так и для селективного подбора ТЭД.

Из рисунку 4 видно, как изменяется действительная сила тяги $F_d(cn)$ на каждой колесной паре. Произведенный селективный подбор позволяет снизить частоту и диапазон регулирования ТЭД, повысить тяговые качества на 4,9 % ($C=0,82$).

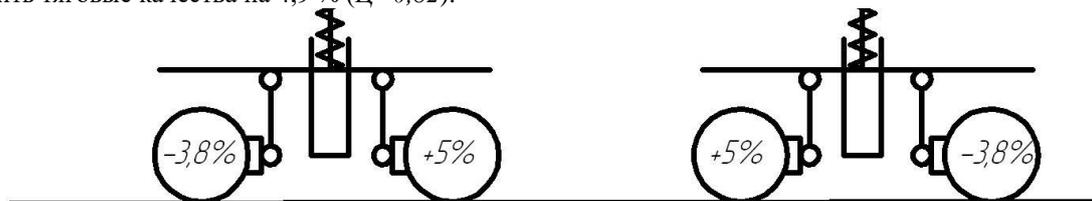


Рис. 4. Распределение вращающих моментов по колесным парам маневрового тепловоза ТЭМ103 при селективном подборе

Таблиця 2

Распределение вращающихся моментов по колесным парам тепловоза ТЭМ103

№ i-й пары	1	2	3	4
При наихудшем подборе	+ 3,8 %	- 5 %	- 5 %	+ 3,8 %
При селективном подборе	- 3,8 %	+ 5 %	+ 5 %	- 3,8 %
Значение целевой функции Ц = 0,85				

Таблиця 3

Распределение вращающихся моментов по колесным парам тепловоза 2ТЭ116

№ i-й пары	1	2	3	4	5	6
При наихудшем подборе	+ 5 %	- 5 %	- 5 %	- 5 %	- 5 %	- 5 %
Значение целевой функции Ц = 0,77						
При селективном подборе	- 5 %	+ 5 %	+ 3,22 %	+ 3,22 %	+ 5 %	- 5 %
Значение целевой функции Ц = 0,89						

Выводы. Для оценки тягово-сцепных качеств локомотивов и выбора наиболее выгодного технического решения предлагается использовать разработанную целевую функцию. Исходя из этого, было предложено техническое решение по селективному подбору вращающихся моментов ТЭД. Согласно проведенной оценке по целевой функции, внедрение такого решения при конструировании локомотивов, позволяет повысить тяговые качества на 4,9 %. В свою очередь при установке догружающих устройств, на локомотивы, тяговые качества повысятся на 3,7 %. Селективный подбор является эффективным методом для решения данной проблемы.

Список используемой литературы:

1. Голубенко О.Л. Зчеплення колеса з рейкою / О.Л. Голубенко. – 2-е изд. доп. и перераб. – Луганськ : Из-во ВУГУ, 1999. – 476 с.
2. Горбунов Н.И. Исследование явления очистки рельса колесами локомотива / Н.И. Горбунов, В.А. Слащев, В.П. Ткаченко // Конструирование и производство транспортных машин. – Вып. 21. – Х., 1989. – С. 77–80.
3. Горбунов Н.И. Повышение тяговых свойств локомотивов за счет усовершенствования связей кузова с тележками / Н.И. Горбунов, Е.А. Кравченко, С.Г. Грищенко, Ю.Ю. Осенин // Труды VIII-ой Международной конференции «Трибология и надежность». – СПб. : Петербургский государственный университет путей сообщений, 2008. – С. 20–33.
4. Горбунов Н.И. Повышение эффективности эксплуатации тягового подвижного состава / Н.И. Горбунов, А.И. Костюкевич, Е.А. Кравченко, А.И. Фесенко // Наукові вісті Далівського університету. – Електронне наукове фахове видання. – 2010. – № 1 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://www.nbu.gov.ua/e-journals/Nvdu/2010_1/10gnitps.htm.
5. Пути решения проблемы повышения тяговых качеств локомотивов / Н.И. Горбунов, А.Л. Капура, С.В. Попов, Е.А. Кравченко, А.И. Фесенко // Международный информационный научно-технический журнал «Локомотивинформ». – 2008. – №5 – С. 8–11.
6. Машини електрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия : ДСТУ ГОСТ 2582:2017, IDT; ІЕС 60349-1:2010, NEQ; ІЕС 60349-2:2010, NEQ : Чинний від 2017–03–01. – Київ : Держспоживстандарт України, 2017. – 35 с.
7. Евстратов А.С. Экипажные части тепловозов / А.С. Евстратов. – М. : Машиностроение, 1987. – 136 с.
8. Камаев В.А. Конструкция, расчет и проектирование локомотивов / В.А. Камаев. – М. : Машиностроение, 1981. – 351 с.
9. Коняев А.Н. Пути улучшения тяговых качеств тепловозов 2ТЭ10Л / А.Н. Коняев, И.К. Спирагин // Сб. «Локомотивостроение». – 1971. – Вып. 3. – С. 19–24.
10. Кравченко К.О. Обґрунтування резервів підвищення тягових якостей локомотива та їх реалізація керуванням ковзання в системі колеса з рейкою : автореф. дис. ... к.т.н. : Спец. 05.22.07 / К.О. Кравченко. – Східноукраїнський національний університет ім. В.Даля. – Луганськ, 2010. – 23 с.
11. Львов Н.В. Влияние некоторых параметров механической части ЭПС на реализацию силы тяги : дис. ... к.т.н. : Спец. 05.22.07 / Н.В. Львов. – М., 1979. – 154 с.
12. Минов Д.К. Повышение тяговых свойств электровозов и тепловозов с электрической передачей / Д.К. Минов. – М. : Транспорт, 1965. – 26 с.
13. Новиков В.М. Расчет системы перераспределения тяговых нагрузок при трогании тепловоза 2ТЭ116 / В.М. Новиков, А.А. Луценко // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В.Даля. – Луганськ : Вид-во ВНУ ім. В.Даля. – 2008. – № 5 (123). – Ч. 2. – С. 46–52.
14. Островский В.С. Система адаптивного поосного управления силой тяги электровоза однофазно-постоянного тока : автореф. дис. ... к.т.н. : Спец. 05.22.07 / В.С. Островский. – Моск. гос. ун-т путей сообщ. ; МИИТ. – М. : МИИТ, 1997. – 23 с.

15. Розенфельд В.Е. Теория электрической тяги / В.Е. Розенфельд, В.П. Исаев, Н.Н. Сидоров. – М. : Транспорт, 1983. – 328 с.
16. Федяев В.Н. Влияние электрической и механической подсистем магистрального тепловоза на реализацию предельных тяговых усилий : автореф. дис. ... к.т.н. : Спец. 05.22.07 / В.Н. Федяев. – ГОУ ВПО «Брянский государственный технический университет». – Брянск : БГТУ, 2006. – 20 с.
17. Фурфрянский Н.А. Развитие локомотивной тяги / Н.А. Фурфрянский, А.Н. Долганов, А.С. Нестрахов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Транспорт, 1988. – 344 с.
18. Шлюнеггер Х. Использование коэффициента сцепления / Х.Шлюнеггер // Железные дороги мира. – 1990. – № 9. – С. 15–21.
19. Golubenko A. Kinematics of point-to-point contact of wheels with a rails / A.Golubenko, S.Sapronova, V.Tkachenko // *Transport Problems*. – 2007. – № 2. – Pp. 57–61.
20. Regularities of shaping of a wheel profile as a result of deterioration of the rolling surface in exploitation / V.Tkachenko, N.Kramar, A.Voronko, S.Sapronova // *Transport Problems*. – 2008. – № 3. – Pp. 47–54.

References:

1. Golubenko, O.L. (1999), *Zcheplennja kolesa z rejkoju*, 2nd dop. i pererab., Iz-vo VUGU, Lugans'k, 476 p.
2. Gorbunov, N.I., Slashhev, V.A. and Tkachenko, V.P. (1989), «Issledovanie javlenija ochistki rel'sa kolesami lokomotiva», *Konstruirovanie i proizvodstvo transportnyh mashin*, Iss. 21., Pp. 77–80.
3. Gorbunov N.I., Kravchenko E.A., Grishhenko, S.G. and Osenin, Ju.Ju. (2008), «Povyshenie t'jagovyh svojstv lokomotivov za schet usovershenstvovanija svjazej kuzova s telezhkami», *Trudy VIII-oj Mezhdunarodnoj konferencii «Tribologija i nadezhnost'»*, Peterburgskij gosudarstvennyj universitet putej soobshhenij, SPb., Pp. 20–33.
4. Gorbunov, N.I., Kostjuevich, A.I., Kravchenko, E.A. and Fesenko, A.I. (2010), «Povyshenie jeffektivnosti jekspluatacii t'jagovogo podvizhnogo sostava», *Naukovi visti Daliv's'kogo universitetu*, Elektronne naukovе fahove vidannja, No. 1, available at: http://www.nbu.gov.ua/e-journals/Nvdu/2010_1/10gnitps.htm
5. Gorbunov, N.I., Kashura, A.L., Popov, S.V., Kravchenko, E.A. and Fesenko, A.I. (2008), «Puti reshenija problemy povyshenija t'jagovyh kachestv lokomotivov», *Mezhdunarodnyj informacionnyj nauchno-tehnicheskij zhurnal «Lokomotivinform»*, No. 5, Pp. 8–11.
6. Derzhspozhivstandart Ukraїni (2017), *Mashiny elektricheskiye vrashchayushchiesya tyagovyye. Obshchiye tekhnicheskiye usloviya*, DSTU GOST 2582: 2017, IDT, IEC 60349-1: 2010, NEQ, IEC 60349-2: 2010, NEQ), Chinniy v 2017-03-01, Kiїv, 35 p.
7. Evstratov, A.S. (1987), *Jekipazhnye chasti teplovozov*, Mashinostroenie, M., 136 p.
8. Kamaev, V.A. (1981), *Konstrukcija, raschet i proektirovanie lokomotivov*, Mashinostroenie, M., 351 p.
9. Konjaev, A.N. and Spirjagin, I.K. (1971), «Puti uluchshenija t'jagovyh kachestv teplovozov 2TJe10L», «Lokomotivostroenie», Sb., Iss. 3, Pp. 19–24.
10. Kravchenko, K.O. (2010), *Obtruntuvannja rezerviv pidvishhennja t'jagovyh jakostej lokomotiva ta ih realizacija keruvannjam kovzannja v sistemi kolesa z rejkoju*, abstract of dis. k.t.n., spec. 05.22.07, Shidnoukraїn's'kij nacional'nij universitet im. V.Dalja, Lugansk, 23 p.
11. L'vov, N.V. (1979), *Vlijanie nekotoryh parametrov mehanicheskoy chasti JePS na realizaciju sily t'jagi*, abstract of dis. k.t.n., spec. 05.22.07, M., 154 p.
12. Minov, D.K. (1965), *Povyshenie t'jagovyh svojstv jelektrovozov i teplovozov s jelektricheskoy peredachej*, Transport, M., 26 p.
13. Novikov, V.M. and Lucenko, A.A. (2008), «Raschet sistemy pereraspredelenija t'jagovyh nagruzok pri troganii teplovoza 2TJe116», *Visnik Shidnoukraїn's'kogo nacional'nogo universitetu im. V.Dalja*, No. 5 (123), P. 2, Pp. 46–52.
14. Ostrovskij, V.S. (1997), *Sistema adaptivnogo poosnogo upravlenija siloj t'jagi jelektrovoza odnofazno-postojannogo toka*, abstract of dis. k.t.n., spec. 05.22.07, Mosk. gos. un-t putej soobshh., MIIT, M., 23 p.
15. Rozenfel'd, V.E., Isaev, V.P. and Sidorov, N.N. (1983), *Teorija jelektricheskoy t'jagi*, Transport, M., 328 p.
16. Fedjaev, V.N. (2006), *Vlijanie jelektricheskoy i mehanicheskoy podsystem magistral'nogo teplovoza na realizaciju predel'nyh t'jagovyh usilij*, abstract of dis. k.t.n., spec. 05.22.07, GOU VPO «Brjanskij gosudarstvennyj tehniceskij universitet», Brjansk, 20 p.
17. Fufrijanskij, N.A., Dolganov, A.N. and Nestrachov, A.S. (1988), *Razvitie lokomotivnoj t'jagi 2nd*, pererab. i dop., Transport, M., 344 p.
18. Shljunegger, X. (1990), «Ispol'zovanie kojefficienta sčeplenija», *Zheleznye dorogi mira*, No. 9, Pp. 15–21.
19. Golubenko, A., Sapronova, S. and Tkachenko, V. (2007), «Kinematics of point-to-point contact of wheels with a rails», *Transport Problems*, No. 2, Pp. 57–61.
20. Tkachenko, V., Kramar, N., Voronko, A. and Sapronova, S. (2008), «Regularities of shaping of a wheel profile as a result of deterioration of the rolling surface in exploitation», *Transport Problems*, No. 3, Pp. 47–54.

Герлицы Юрай – профессор, заведующий кафедры транспорта и подъёмно-транспортных машин Жилинского университета, Словакия.

Научные интересы:

- взаимодействие колеса с рельсом;
- торможение рельсового транспортного средства.

E-mail: juraj.gerlici@fstroj.uniza.sk.

Кравченко Екатерина Александровна – кандидат технических наук, доцент научный сотрудник кафедры транспорта и подъёмно-транспортных машин Жилинского университета, Словакия.

Научные интересы:

- сцепление колеса с рельсом;
- тормозные элементы подвижного состава.

E-mail: kkatherina@ukr.net.

Хаусер Владимир – кандидат технических наук, научный сотрудник кафедры транспорта и подъёмно-транспортных машин Жилинского университета, Словакия.

Научные интересы:

- ходовая часть транспортного средства;
- компьютерное моделирование.

E-mail: vladimir.hauser@fstroj.uniza.sk.

Горбунов Николай Иванович – доктор технических наук, заведующий кафедры железнодорожного, автомобильного транспорта и подъёмно-транспортных машин Восточноукраинского национального университета имени Владимира Даля.

Научные интересы:

- динамика механических систем;
- сцепление колеса с рельсом.

E-mail: gorbunov0255@gmail.com.

Кравченко Александр Петрович – доктор технических наук, заведующий кафедры автомобилей и транспортных технологий Житомирского государственного технологического университета.

Научные интересы:

- динамика транспортного средства;
- эксплуатация и надёжность автомобилей.

E-mail: avtoap@ukr.net.

Ткаченко Виктор Петрович – доктор технических наук, заведующий кафедры тяговой подвижной состав железных дорог Государственного университета инфраструктуры и технологий.

Научные интересы:

- прогнозирование износа трибосистем;
- сопротивление движению транспортных средств;
- устойчивость и вписывание в кривые транспортных средств;

E-mail: v.p.tkachenko.detut@gmail.com.

Сапронова Светлана Юрьевна – доктор технических наук, профессор кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» Государственного университета инфраструктуры и технологий.

Научные интересы:

- износ кинематической пары «колесо-рельс»;
- зубчатая передача тяговых редукторов тепловозов;
- сопротивление движению и устойчивость транспортных средств.

E-mail: doc.sapronova@gmail.com.

Статья поступила в редакцию 03.09.2018.