

## Транспорт

УДК 629.4+681.518:658.512.01

DOI:

В.И. Воробьев, О.В. Измеров, М.А. Маслов

## ВЫБОР ОБЪЕКТНОЙ МОДЕЛИ ТЯГОВОГО ПРИВОДА ЛОКОМОТИВА

Рассмотрена задача выбора объектной модели технических решений механической части тягового привода локомотива. Предложена модель в виде иерархии множеств описаний при разной степени его схематизации и библиотеки описаний типовых объектов в виде иерархической структуры

функционального взаимодействия между элементами.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, тяговый привод локомотива, автоматизация проектирования, объектная модель.

V.I. Vorobiev, O.V. Izmerov, M.A. Maslov

## OBJECT MODEL OF LOCOMOTIVE TRACTION DRIVE

The problem of choice of object model technical solutions to the mechanical part of the traction drive of the locomotive. The proposed model in a hierarchy of sets of descriptions with varying degree of schematization and the library description of the model ob-

jects in a hierarchical structure of functional interaction between the elements.

**Keywords:** mathematical modeling, traction drive of the locomotive, design automation, the object model.

Внедрение САПР в процесс проектирования локомотивов пока не привело к соответствующему повышению качества проектных решений тягового привода. На электровозах ЭП1 и ЭП10 имели место случаи выхода из строя резинокордных муфт и узлов подвески редуктора [1] и узлов крепления тягового электродвигателя (ТЭД) к раме тележки [2]. На электровозе 2ЭС6 наблюдались излом поводка подвески ТЭД и выдавливание резины из шарниров подвески [3]. Интеграция ТЭД и осевого редуктора, примененная в приводе электровоза 2ЭС10, позволив повысить надежность, привела к общей нетехнологичности привода, повышению требований к точности из-за сложных размерных цепей и к росту трудоемкости ремонта. Эти результаты свидетельствуют о том, что слабым местом проектирования тяговых приводов на данный момент является моделирование их технических решений. Предлагаемая статья является попыткой решения указанной проблемы.

время имеется ряд методов конструирования [11; 12], основанных на моделях процесса проектирования, которые, согласно классификации [4], можно отнести к алгоритмическим моделям. Применению этих моделей в САПР препятствуют два обстоятельства. Во-первых, известные методики носят эмпирический характер, вследствие чего к настоящему времени предложено множество возможных алгоритмов поиска технического решения без однозначных критериев выбора наилучшего алгоритма. Во-вторых, данные алгоритмы рассчитаны на использование их человеком, вследствие чего не был рассмотрен вопрос о выборе типа модели технического решения для создания процедур связи с известными системами САПР.

В качестве общей методологической основы для моделирования технических решений тягового привода примем концепцию, изложенную С.В. Никитиным [5]. Согласно этой концепции, систему тягового привода можно представить пятеркой:

Анализ существующей методологии проектирования показал, что в настоящее

$$C = (\varphi, R, A^{(s)}, A^{(Rs)}, A^{(sR)}), \quad (1)$$

где множество  $\varphi = \{S_1 \dots S_p\}$  – состав системы ( $S_1 \dots S_p$  – внутренние элементы  $C$ ); множество  $R = \{R_1 \dots R_q\}$  – окружающая среда (надсистема) ( $R_1 \dots R_q$  – внешние элементы  $C$ ), множество  $A^{(s)}$  – все  $n$ -арные соотношения на элементах (внутренняя структура системы  $C$ ), а множества  $A(sR)$  и  $A(Rs)$  – все  $n$ -арные соотношения между элементами множеств  $\varphi$  и  $R$  (структура связи взаимодействия систем со средой).

Отсюда модель тягового привода – это система из множеств описаний реальных объектов множества. При этом отображение  $\alpha: \varphi' \rightarrow \varphi$  считается гомоморфным отображением множества реальных объектов  $\varphi' = \{S'_1 \dots S'_p\}$  на множество их описаний  $\varphi = \{S_1 \dots S_p\}$ , если  $\varphi$  имеет тот же состав, что и множество  $\varphi'$ . Соответственно отображение системы  $C' = C(\varphi', R', A^{(s')}, A^{(R's')}, A^{(s'R)})$  на систему  $C = C(\varphi, R, A^{(s)}, A^{(RS)}, A^{(SR)})$  считается заданным, если задана пятерка отображений:

$$\alpha_1: \varphi' \rightarrow \varphi; \quad \alpha_2: R' \rightarrow R;$$

$$\alpha_3: A^{(s')} \rightarrow A^{(s)}; \quad \alpha_4: A^{(R's')} \rightarrow A^{(RS)};$$

$$\alpha_5: A^{(s'R)} \rightarrow A^{(SR)}.$$

Описанный в [5] подход позволяет создать корректные математические модели конструкции, которые представляют собой набор связанных друг с другом элементов, входящих в библиотеки известных продуктов различных фирм (АСКОН, Autodesk, SolidWorks и др.).

Например, торсионный вал тягового привода электровоза (рис. 1) может быть представлен как система из подконструкций «Стержень», «Посадка с натягом» и «Переходная галтель», которые связаны с подконструкциями «Фланец упругой муфты» и «Фланец зубчатой муфты» и друг с другом.

Библиотечный элемент в виде массива данных может включать в себя элементы разного назначения (графический объект для системы создания конструкторской документации, элемент для моделирования физических процессов и т.п.). Для обеспечения совместимости разных систем при обращении к нему он может быть сконвертирован в файл требуемого формата. При

необходимости пользователями или администраторами системы могут быть созданы новые элементы.

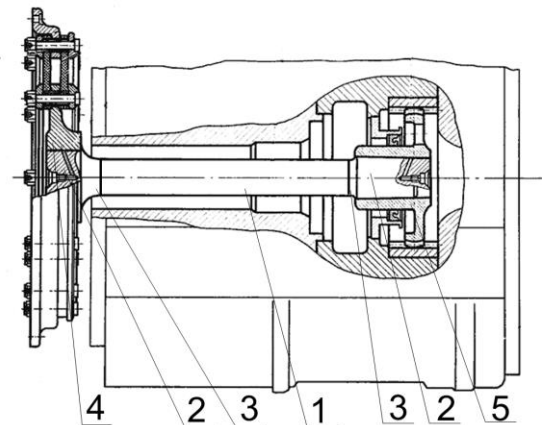


Рис. 1. Разбиение на подконструкции торсионного вала тягового привода электровоза: 1 – «Стержень»; 2 – «Посадка с натягом»; 3 – «Переходная галтель»; 4 – «Фланец упругой муфты»; 5 – «Фланец зубчатой муфты»

Метод моделирования, изложенный в [5], не имеет ограничений для формализации тягового привода как системы и позволяет автоматизировать процедуру отнесения детали или узла привода к тому или иному классу путем сравнения признаков. Основным недостатком этого метода является процедура создания новых решений, основанная на стихийно-эволюционном подходе: сначала выбирается прототип конструкции, а затем путем эмпирического анализа его эволюции создается усовершенствованная конструкция. Однако основной задачей при проектировании тяговых приводов в настоящее время является не столько усовершенствование ранее известных конструкций, сколько создание новых под существенно изменившиеся требования (непосредственный тяговый привод, привод для низкопольных экипажей и т.п.).

Для устранения данного недостатка воспользуемся положением о том, что основой построения объектной модели технической системы является классификация технических систем: «Наличие классификации технических систем позволяет идентифицировать вид структуры сложной технической системы, что позволяет провести декомпозицию системы в соответствии с типовой структурой» [6]. В насто-

ящее время авторами предложена классификация тяговых приводов локомотивов и другого рельсового подвижного состава, ориентированная на поиск новых решений [7], а в [8] предложен метод создания таких классификаций, основанный на общей алгоритмической модели процесса проектирования [9]. Отсюда следует, что объектная модель, то есть модель, которая описывает структуру объектов, составляющих систему, их атрибуты, операции, взаимосвязи с другими объектами и отражает прагматику разрабатываемой системы [10], должна отражать алгоритмическую модель процесса проектирования как базовую основу классификации (моделировать динамику создания тягового привода от наиболее общих схем до конкретного изделия). В то же время объектная модель должна соответствовать общей задаче – позволять максимально приблизить методологию проектирования привода к методам проектирования радиоэлектронной аппаратуры, где достигнута высокая сте-

пень автоматизации за счет применения стандартных элементов и комплектующих изделий.

Указанная цель достигается тем, что обобщенная объектная модель тягового привода локомотива состоит из двух частей: иерархии множеств описаний тягового привода при разной степени его схематизации, от набора базовых функций до описаний функциональных элементов – деталей и подконструкций, и библиотеки, содержащей описания типовых объектов – составных частей тягового привода, разделенных на функциональные элементы и описанных в виде иерархической структуры функционального взаимодействия между элементами (И-графа). При этом на уровне определения функциональных элементов привода производится поиск сходных объектов в библиотеке с помощью матриц мер сходства, а дальше процесс проектирования ведется путем видоизменения распознанных типовых узлов и деталей (рис. 2).

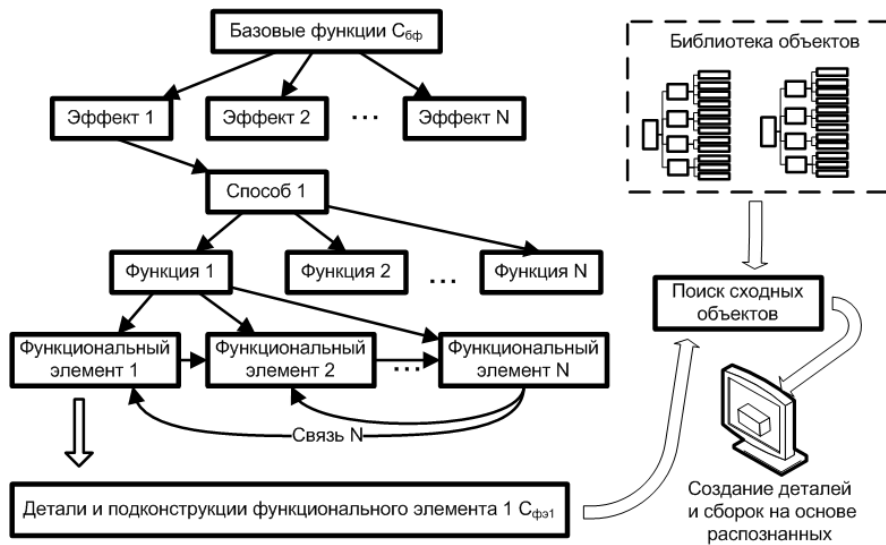


Рис. 2. Схема обобщенной объектной модели конструкции тягового привода

Для упрощения используем меру сходства в виде неотрицательной вещественной функции

$$C(R_i, R_j) = \frac{2m(R_i \cap R_j)}{m(R_i) + m(R_j)}, \quad (2)$$

где  $m(R_i \cap R_j)$  - число общих видов в описаниях  $R_i$  и  $R_j$ ;  $m(R_i)$  и  $m(R_j)$  - число видов в описаниях  $R_i$  и  $R_j$ .

Рассмотрим пример поиска прототипа в библиотеке объектов. Пусть  $R_1$  – описание проектируемого торсионного вала,  $R_2-R_7$  – описания прототипов,  $S_1-S_{12}$  – признаки объектов (табл. 1). На основании табл. 1 составляем видовые списки (табл.

2). Пусть множества  $m(R_i)$ ,  $m(R_j)$  - количество признаков  $i$ -го и  $j$ -го вариантов в видовых списках, множество  $m(R_i \cap R_j)$  - количество признаков, одновременно имеющих у  $i$ -го и  $j$ -го вариантов. Тогда мера включения множества признаков  $i$ -го варианта в  $j$ -й -

$$W(R_j; R_i) = \frac{m(R_i \cap R_j)}{m(R_i)}, \quad (3)$$

а мера включения множества призна-

ков  $j$ -го варианта в  $i$ -й -

$$W(R_i; R_j) = \frac{m(R_i \cap R_j)}{m(R_j)}, \quad (4)$$

На основании (3) и (4) вычисляем значения элементов матрицы мер включения (табл. 3) в процентах, округляя полученные значения до целых чисел.

Таблица 1

Библиотека объектов

При- знак	R <sub>1</sub> Проект	R <sub>2</sub> 2ТЭ121	R <sub>3</sub> ЭП1	R <sub>4</sub> ДС3	R <sub>5</sub> ЧС1	R <sub>6</sub> ЧС2К	R <sub>7</sub> ЧС7(Е8)
S <sub>1</sub>	Стержень	Стержень	Стержень	Стержень	Стержень	Стержень	Стержень
S <sub>2</sub>	-	-	-	-	Конус	-	-
S <sub>3</sub>	Конич. посадка	Конич. посадка	Конич. посадка	-	-	-	-
S <sub>4</sub>	-	Цилинд. посадка	Цилинд. посадка	-	-	-	-
S <sub>5</sub>	-	-	-	-	Торцевые шлицы	-	-
S <sub>6</sub>	Радиальн. шлицы	-	-	Радиальн. шлицы	-	Радиальн. шлицы	Радиальн. шлицы
S <sub>7</sub>	-	-	-	-	-	Поводок	Поводок
S <sub>8</sub>	Галтель	Галтель	Галтель	Галтель	-	Галтель	Галтель
S <sub>9</sub>	-	-	-	-	Резьба внутр.	-	-
S <sub>10</sub>	Резьба наружная	-	-	Резьба наружная	-	Резьба наружная	Резьба наружная
S <sub>11</sub>	-	Канал	Канал	-	-	-	-
S <sub>12</sub>	Бурт	-	-	Бурт	-	Бурт	Бурт

Элемент матрицы мер пересечения (табл. 4) в  $i$ -й строке и  $j$ -м столбце есть  $m(R_i \cap R_j)$ , отсюда  $m(R_i \cap R_i) = m(R_i)$ . Элементы матрицы мер сходства (табл. 5) вычислены по формуле (2).

Например, для вариантов  $R_1$  и  $R_2$  число видов в описаниях признаков  $m(R_1)=6$ ,  $m(R_2)=5$ ,  $m(R_1 \cap R_2) = 3$ . Тогда

$$W(R_2; R_1) = \frac{m(R_1 \cap R_2)}{m(R_1)} = \frac{3}{6} = 50\%$$

(вторая строка - первый столбец табл. 3);

$$W(R_1; R_2) = \frac{m(R_1 \cap R_2)}{m(R_2)} = \frac{3}{5} = 60\%$$

(первая строка - второй столбец табл. 3). Соответственно в табл. 4 первая строка  $m(R_1)=6$ , вторая строка - первый столбец

$m(R_1 \cap R_2) = 3$ , вторая строка второй столбец  $m(R_2)=5$ , а в табл. 5

$$C(R_1 R_2) = \frac{2m(R_1 \cap R_2)}{m(R_1) + m(R_2)} = \frac{2 \cdot 3}{6 + 5} = \frac{6}{11} = 55\%$$

(первая строка - первый столбец табл. 5). Как видно из матрицы мер сходства (табл. 5), наибольшее значение в столбце прототипа  $R_1$  (91) оказывается для строки прототипа  $R_4$ . Следовательно, близким к проектируемому объекту оказывается торсионный вал электровоза ДС3, который используется в качестве прототипа и изменяется в соответствии с заданными требованиями.

Далее в конструкции торсионного вала выделяется подконструкция, которая

отличает ее от прототипа детали (коническая посадка), и для нее производится поиск прототипа исходя из признаков, опи-

сывающих конструктивные особенности и предполагаемую технологию изготовления.

Таблица 2

## Видовые списки

	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	R <sub>4</sub>	R <sub>5</sub>	R <sub>6</sub>	R <sub>7</sub>
S <sub>1</sub>	1	1	1	1	1	1	1
S <sub>2</sub>	0	0	0	0	1	0	0
S <sub>3</sub>	1	1	1	0	0	0	0
S <sub>4</sub>	0	1	1	0	0	0	0
S <sub>5</sub>	0	0	0	0	1	0	0
S <sub>6</sub>	1	0	0	1	0	1	1
S <sub>7</sub>	0	0	0	0	0	1	1
S <sub>8</sub>	1	1	1	1	0	1	1
S <sub>9</sub>	0	0	0	0	1	0	0
S <sub>10</sub>	1	0	0	1	0	1	1
S <sub>11</sub>	0	1	1	0	0	0	0
S <sub>12</sub>	1	0	0	1	0	1	1

Таблица 3

## Матрица мер включения

	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	R <sub>4</sub>	R <sub>5</sub>	R <sub>6</sub>	R <sub>7</sub>
R <sub>1</sub>		60	60	100	20	100	100
R <sub>2</sub>	50		100	40	25	33	33
R <sub>3</sub>	50	100		40	25	33	33
R <sub>4</sub>	83	40	40		25	83	83
R <sub>5</sub>	17	20	20	20		17	17
R <sub>6</sub>	83	40	40	100	25		100
R <sub>7</sub>	83	40	40	100	25	100	

Таблица 4

## Матрица мер пересечения

R <sub>1</sub>	6						
R <sub>2</sub>	3	5					
R <sub>3</sub>	3	5	5				
R <sub>4</sub>	5	2	2	5			
R <sub>5</sub>	1	1	1	1	4		
R <sub>6</sub>	5	2	2	5	1	6	
R <sub>7</sub>	5	2	2	5	1	6	6
	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	R <sub>4</sub>	R <sub>5</sub>	R <sub>6</sub>	R <sub>7</sub>

Таблица 5

## Матрица мер сходства

R <sub>2</sub>	55					
R <sub>3</sub>	55	100				
R <sub>4</sub>	91	40	40			
R <sub>5</sub>	20	22	22	22		
R <sub>6</sub>	83	37	36	91	20	
R <sub>7</sub>	83	37	36	91	20	100
	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	R <sub>5</sub>	R <sub>6</sub>	R <sub>7</sub>

Упрощенно говоря, предложенная объектная модель позволяет реализовать процесс автоматических подсказок типовых решений конструктору во время проектирования. Это отражает принцип конструирования, когда новая конструкция реализуется на базе максимально изученных и освоенных производством элементов и решает проблему поиска элементов в каталогах, характерную, например, для [12]. Экономический эффект от использования предложенной объектной модели заключается в снижении издержек от ошибок проектирования, выявляемых после изготовления опытных образцов.

## Выводы:

1. Основным недостатком известных методов моделирования новых техниче-

ских решений механической части тягового привода локомотива является использование стихийно-эволюционного подхода.

2. Предложена объектная модель конструкции тягового привода в виде иерархии множеств описаний при разной степени его схематизации и библиотеки описаний типовых объектов в виде иерархической структуры функционального взаимодействия между элементами (И-графа), позволяющая реализовать автоматические подсказки как типовые конструкции из библиотеки описаний, найденные с помощью матриц мер сходства.

3. Предложенная модель конструкции позволяет сократить число ошибок проектирования за счет того, что новая конструкция реализуется с максимальным ис-

пользованием ранее изученных и техноло-

гически отработанных аналогов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соколов, Ю.Н. Повышение надежности узлов тягового привода пассажирских электровозов ЭП1М и ЭП10 / Ю.Н. Соколов, А.С. Пономарев, В.Е. Дегтярев // Локомотив-информ. – 2010. – № 6. – С. 4-11.
2. Вахромеева, Т.О. Снижение динамических нагрузок в тяговых приводах электровозов с рамным подвешиванием тяговых двигателей и карданными муфтами: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Т.О. Вахромеева. - М., 2014. – 24 с.
3. Корнев, А.М. Модернизация системы подвешивания ТЭД электровоза постоянного тока 2ЭС6 / А.М. Корнев, Д.В. Липунов // Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов. - Омск: ОмГУПС, 2016. – С. 237-242.
4. Аверченков, В.И. Основы математического моделирования технических систем: учеб. пособие / В.И. Аверченков, В.П. Федоров, М.Л. Хейфец. - Брянск: БГТУ, 2004. – 271 с.
5. Никитин, С.В. Моделирование новых технических решений локомотивов: учеб. пособие / С.В. Никитин. - Брянск: БИТМ, 1988. – 84 с.
6. Запорожцев, А.В. Моделирование технических систем / А.В. Запорожцев // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 8-6. – С. 1288-1294.
7. Измеров, О.В. Классификация как инструмент синтеза механической части тяговых приводов

железнодорожного подвижного состава / О.В. Измеров, Г.С. Михальченко // Мир транспорта и технологических машин. – Орел: ГУ-УНПК, 2012. - № 4 (39). - С. 53-60.

8. Воробьев, В.И. Общие принципы классификации механической части тяговых приводов локомотивов / В.И. Воробьев, О.В. Измеров, А.А. Пугачев, Д.А. Бондаренко // Совершенствование энергетических машин: сб. науч. тр. / под ред. В.В. Роголѳова. – Брянск: БГТУ, 2015. - С. 241-248.
9. Измеров, О.В. Кибернетические аспекты методов синтеза электромеханических систем: монография / О.В. Измеров [и др.]; под ред. А.С. Космодамианского. – Орел: ГУ-УНПК, 2015. – 234 с.
10. Буч, Г. Объектно-ориентированный анализ и проектирование с примерами приложений: [пер. с англ.] / Гради Буч, Роберт А. Максимчук, Майкл У. Энгл, Бобби Дж. Янг, Джим Коналлен, Келли А. Хьюстон. – 3-е изд. - М.: Вильямс, 2008. – 720 с.
11. Koller, R. Konstruktionsmethode fur den Maschinen-, Gerate- und Apparatebau / R. Koller. - Springer, 1976. – 191 p.
12. Roth, K. Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Band 1. Konstruktionslehre / K. Roth. – Berlin: Springer, 2000. – 440 p.

1. Sokolov, YU.N. Povyshenie nadezhnosti uzlov tyagovogo privoda passazhirskih ehlektrovozov EHP1M i EHP10 / YU.N. Sokolov, A.S. Ponomarev, V.E. Degtyarev // Lokomotiv-inform. – 2010. – № 6. – S. 4-11.
2. Vahromeeva, T.O. Snizhenie dinamicheskikh nagruzok v tyagovykh privodakh ehlektrovozov s ramnym podveshivaniem tyagovykh dvigatelej i kardannymi muftami: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk/ T.O. Vahromeeva. M., 2014. – 24 s.
3. Kornev, A.M. Modernizatsiya sistemy podveshivaniya TEHD ehlektrovoza postoyannogo toka 2EHS6 / A.M. Kornev, D.V. Lipunov // EHkspluatatsionnaya nadezhnost' lokomotivnogo parka i povyshenie ehffektivnosti tyagi poezdov. OM-GUPS, Omsk: 2016. – С. 237-242.
4. Averchenkov, V.I. Osnovy matematicheskogo modelirovaniya tekhnicheskikh sistem: ucheb. posobie / V.I. Averchenkov, V.P. Fedorov, M.L. Hejfec. Bryansk: BGTU, 2004. – 271s.
5. Nikitin, S.V. Modelirovanie novyh tekhnicheskikh reshenij lokomotivov: ucheb. posobie / S.V. Nikitin. Bryansk: BITM, 1988. – 84 s.
6. Zaporozhcev, A.V. Modelirovanie tekhnicheskikh sistem /A.V. Zaporozhcev // Fundamental'nye issledovaniya. – 2014. – № 8-6. – S. 1288-1294.
7. Izmerov, O.V. Klassifikatsiya kak instrument sinteza mekhanicheskoy chasti tyagovykh privodov zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava/ O.V. Iz-

merov, G.S. Mihal'chenko // Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin. – Орел: GU-UNPK, 2012. - №4 (39). - S. 53-60.

8. Vorob'ev, V.I. Obshchie principy klassifikatsii mekhanicheskoy chasti tyagovykh privodov lokomotivov / V.I. Vorob'ev, O.V. Izmerov, A.A. Puga-chev, D.A. Bondarenko // Sovershenstvovanie ehnergeticheskikh mashin: sb. nauch. tr. / pod red. V.V. Rogalyova. – Bryansk: BGTU, 2015. – S. 241-248.
9. Izmerov, O.V. Kiberneticheskie aspekty metodov sinteza ehlektromekhanicheskikh sistem: monografiya / O.V. Izmerov [i dr.]; pod red. A.S. Kosmodamianskogo. – Орел: Gosuniversitet - UNPK, 2015. – 234 s.
10. Buch, G. Ob"ektно-orientirovan-nyj analiz i proektirovanie s primerami prilozhenij [per. s angl.] / Gradi Buch, Robert A. Maksimchuk, Majkl U. EHngl, Bobbi Dzh. YAng, Dzhim Konallen, Kelli A. H'yuston. – 3-e izd: M.: Vil'yams, 2008. – 720 s.
11. Koller, R. Konstruktionsmethode fur den Maschinen-, Gerate- und Apparatebau: / R. Koller. Springer, 1976. – 191p.
12. Roth, K. Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Band 1 Konstruktionslehre / K. Roth. Berlin, Springer: 2000. – 440p.

*Статья поступила в редколлегию 15.06.17.*

*Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного  
технического университета  
Горленко О.А.*

**Сведения об авторах:**

**Воробьев Владимир Иванович**, к.т.н., доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог» Брянского государственного технического университета, e-mail: [vladimvorobiev@yandex.ru](mailto:vladimvorobiev@yandex.ru).

**Измеров Олег Васильевич**, соискатель кафедры «Подвижной состав железных дорог» Брянского

**Vorobiev Vladimir Ivanovich**, Bryansk State Technical University Ph. D., associate Professor of the Department “Railroad rolling stock” e-mail: [vladimvorobiev@yandex.ru](mailto:vladimvorobiev@yandex.ru).

**Izmerov Oleg Vasilevich**, Bryansk State Technical University Competitor of the Department “Railroad rolling stock”, 56-14-44.

государственного технического университета, тел.: 56-14-44.

**Маслов Максим Александрович**, аспирант кафедры «Подвижной состав железных дорог» Брянского государственного технического университета, e-mail: [maslovmaksim32@mail.ru](mailto:maslovmaksim32@mail.ru).

**Maslov Maksim Aleksandrovich**, Bryansk State Technical University Graduate student of the Department “Railroad rolling stock”, [maslovmaksim32@mail.ru](mailto:maslovmaksim32@mail.ru).