

## **МЕХАНИКА ЩЕТОЧНО-КОЛЛЕКТОРНЫХ УЗЛОВ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ КАРЬЕРНЫХ САМОСВАЛОВ. ОБЗОР И ВЫВОДЫ**

В.Е Ещин<sup>1</sup>, аспирант,

А.В. Кудреватых<sup>1</sup>, к.т.н, доцент, заведующий кафедрой эксплуатации  
автомобилей

<sup>1</sup>Кузбасский государственный технический университет  
имени Т.Ф. Горбачева, г.Кемерово

Щеточно-коллекторный узел (далее ЩКУ) как механическая часть электрической машины известен достаточно давно - с 1834 г. [1]. Изначально создатель первой электрической машины с ЩКУ Б.С. Якоби назвал его - коммутатор.

За неполные двести лет использования ЩКУ в электрических машинах существенных изменений в идеологии его использования не произошло. "...The carbon brush is the integral part on the transfer of current in the rotating machine and although they differ in size, shape and technical composition carbon brushes and collectors all fulfil the same basic function" - "Угольная щетка является неотъемлемой частью передачи тока во вращающейся машине, и, хотя они различаются по размеру, форме и техническому составу, угольные щетки и коллекторы выполняют одну и ту же основную функцию" [2].

Появилось огромное количество вариантов конструкций ЩКУ и "...they differ in size, shape and technical composition", в том числе, на уровне изобретений и тем исследований, которые можно сгенерировать при помощи различных систем искусственного интеллекта (ИИ).

Например, YandexGPT предлагает тему: Моделирование и симуляция работы щёточно-коллекторных узлов. Создание математических моделей и компьютерных симуляций для анализа работы узла и оптимизации его параметров.

По сути, ИИ предлагает проводить исследования работы и оптимизацию механических параметров ЩКУ путем создания цифровых двойников их конструкций [3].

Заметим, что универсальной математической модели конструкции ЩКУ по мнению М. Д. Глущенко и В. В. Зеленова в [4, 2007 г.] нет. Авторы утверждают, что "...отсутствует обоснованная математическая модель механической части щёточно-коллекторного узла".

Существует их (моделей) некоторое множество, определяемое мощностями рассматриваемых объектов, условиями работы ("...size, shape and technical composition") и соответствующими стандартами ( ГОСТ Р 52157-2003, ГОСТ Р 53617 - 2009).

В этой связи разумно "сузить" область существования объекта внимания - ЩКУ, как это сделано в работах [5, 6, 7], где рассматривается привод карьерных самосвалов БелАЗ.

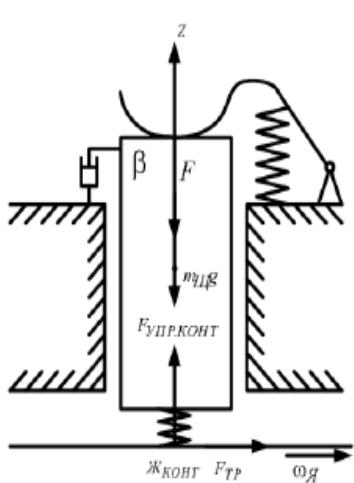
Самосвал БелАЗ по ГОСТ Р 54976—2012 ОБОРУДОВАНИЕ ГОРНО-ШАХТНОЕ - "...карьерный автосамосвал, предназначенный для перевозки угля и вскрышных пород с большой объемной массой и отличающийся от обычных моделей автосамосвалов увеличенной емкостью кузова".

Известно, что такой автосамосвал является генератором собственных механических вибраций и упругих колебаний. В частности, работе А.А. Кулешова и А.А. Беликова [8] отмечено: "... При работе дизеля вибрации создают кривошипно-шатунный механизм, клапанно-распределительный механизм, процесс сгорания топлива, система подачи топлива (система питания), система впуска и выпуска, цилиндро - поршневая группа, турбокомпрессор и другие вспомогательные механизмы. Таким образом, практически все составные элементы дизеля формируют его вибрацию. Вибрация в свою очередь создаётся ударами в сопряжениях, вызывающими их деформацию и упругие колебания".

Упругие колебания – крайне нежелательные явления, поскольку ещё в 1837 году W.Albert [9] установил, что усталость не связана со случайными перегрузками, но зависит от нагрузки и числа повторений циклов нагрузки ("...finding was that fatigue was not associated with an accidental overload, but was dependent on load and the number of repetitions of load cycles").

В совокупности это привело к появлению т.н. усталостным зависимостям (кривые Веллера), полученным, например, в работе Miller, K. J., Mohamed, H. J. и de los Rios, E. R. [10, 1986 г.] и результатов И.А. Паначева и И.В. Кузнецова [11, 2014 г.] для конкретного узла автосамосвала БЕЛАЗ-75131.

Вибрации и упругие колебания – пространственные движения (динамика) всех узлов самосвала БелАЗ, в т.ч., ЩКУ. При этом "...The goal of the dynamic modeling is to establish the set of equations that permit to obtain the torques and/or forces on each joint in terms of the joint variables and their derivatives and considering the inertial and gravity effects" [12]. В этой фразе главные слова "...equations that permit to obtain the torques and/or forces" - "...уравнения, позволяющие получить крутящие моменты и/или силы".



Обратим внимание, что расчетных схем замещения конструкций наиболее распространенных ЩКУ сравнительно немного, в частности, работы А. И. Орленко, А. В. Елисеева. Укажем только на только [13], где рассмотрена, по сути, упрощенная расчетная схема взаимодействия щетки с коллектором.

Однако, далее А. И. Орленко, А. В. Елисеевым, С. В. Елисеевым [14] рассмотрена расчетная схема, которая наиболее близко соответствует ЩКУ куркового типа приводного двигателя ЭДП-800 самосвала БелАЗ.

Здесь же приведена базовая математическая модель движения щетки в виде обыкновенного дифференциального уравнения 2-го порядка.

$$m_{\text{Щ}} \frac{d^2 z(t)}{dt^2} + F(t) + F_{\text{УПР.КОНТ}} + f \cdot F(t) \cdot \text{sign}\left(\frac{dz(t)}{dt}\right) + \beta \frac{dz(t)}{dt} = 0.$$

В исследовании Е.Л. Степанова [15] приведен еще вариант расчетной

схемы, названный: "... расчетная эквивалентная кинематическая схема КЩУ тягового электродвигателя ... с учетом трения в системе" с соответствующей математической моделью – системой ДУ шестого порядка:

$$m_1 \cdot \frac{d^2 z_1(t)}{dt^2} + K_1 \cdot z_1(t) - K_2 \cdot (z_2(t) - z_1(t)) = 0;$$

$$m_2 \cdot \frac{d^2 z_2(t)}{dt^2} + K_2 \cdot (z_2(t) - z_1(t)) - K_3 \cdot (z_3(t) - z_2(t)) = 0;$$

$$m_3 \cdot \frac{d^2 z_3(t)}{dt^2} + K_3 \cdot (z_3(t) - z_2(t)) - K_4 \cdot (z_4(t) - z_3(t)) = 0,$$

О.А. Филиной [16] справедливо отмечено, что "...Изучение механики щеточно-коллекторного узла ... может выполняться в двух аспектах:  
- анализ механических колебаний элементов щеточного узла;

- экспериментальное исследование действия механических факторов на работу щеточно-коллекторного узла. ...".

В работе В.Ю.Саблукова [17] модель ЩКУ представлена нелинейным дифференциальным уравнением:

$$m \ddot{y} + H \text{sign}\left(\dot{y}\right) + (k_1 + k_2) y = k_2 s(t),$$

где  $m$  – масса электрощетки;  $k_1$  – жесткость пружины;  $k_2$  – жесткость контактного слоя;  $H \text{sign}(\dot{y})$  – сила трения;  $y$  – смещение электрощетки;  $s(t)$  – профиль коллектора.

В работе В. В. Харламова, Д. И. Попова, М. Ф. Байсадыкова [18] расчетная схема коллекторно-щеточного узла представлена в системе дифференциальных уравнений движения щетки:

$$M\ddot{z} + F_{\text{тид1}} + F_{\text{тид2}} - P_h - Mg + P_k = 0,$$

$$M\ddot{y} + F_{\text{трр}} + F_{\text{трк}} - Y_1 + Y_2 = 0,$$

Далее она уточнена М.Ф. Байсадыковым и выглядит так:

$$\begin{cases} M\ddot{z} + F_{\text{тид1}} + F_{\text{тид2}} - P_p - Mg + P_k = 0; \\ M\ddot{y} + F_{\text{трр}} + F_{\text{трк}} - F_{c1} + F_{c2} = 0. \end{cases}$$

Нужно отметить, что способы получения упомянутых выше уравнений движения ЩКУ, конечно, хорошо известны и описаны, например в [19, 20].

Это использование уравнения Лагранжа второго рода или прямого и обратного методов по [19] на основе второго закона Ньютона [21] "...The equations of motion for mechanical systems can be found using Newton's second law of motion. In particular, using the position (displacement) vector  $\mathbf{r}$  the Newton

equation in the vector form is given as  $\sum F(t, \mathbf{r}) = m\mathbf{a}$ , where  $F(t, \mathbf{r})$  is the vector sum of all forces applied to the body ;  $a$  is the vector of acceleration of the body with respect to an inertial;  $m$  is the mass of the body".

Заметим, что при построении математических моделей движения ЩКУ превалируют подходы, основанные на использовании второго закона Ньютона. Подобные подходы позволяют получить результаты т.н. внешней динамики исследуемых систем (в нашем случае ЩКУ), т.е. значения таких величин как *перемещение, скорость и ускорение*.

Однако, в [12] было упомянуто, что для оценки и внутренней динамики необходимо иметь "...equations that permit to obtain the torques and/or forces" - "...уравнения, позволяющие получить *крутящие моменты и/или силы*".

Выше было отмечено постоянное присутствие вибраций и колебаний всей массы автосамосвала БелАЗ. Часто они приводят и к серьезным последствиям, например, появлению трещин в металлоконструкциях. Серьезность последствий колебательных режимов и вибраций означает, что механическая система автосамосвала – система, замкнутая по нагрузке, т.е. обладает свойством формирования её (нагрузки) в системе за счет перераспределения кинетической (главным образом) энергии при всяком изменении режима работы самосвала.

Эта особенность определяет необходимость использования в уравнениях механического движения ЩКУ (щеткодержателя и самой щетки) абсолютных значений скоростей.

Другой особенностью математических моделей ЩКУ является их нелинейность - наличие вариантов зависимостей силы трения скольжения от скорости и влияние на значения силы трения колебаний и изменение параметров модели во время работы (например, изменение параметров нажимной пружины в зависимости от износа щетки, т.е. изменения её массы и размеров).

В этой связи можно сделать выводы, что при построении математической модели ЩКУ (цифрового двойника) необходимо минимально учитывать:

- характер сложного движения элементов ЩКУ (абсолютное, переносное, относительное);
- влияние возможных колебаний корпуса ЩКУ на формирование абсолютных значений скоростей движения его компонентов;
- влияние нелинейной зависимости трения скольжения при движении щеток в направляющих (окнах щеткодержателей) и по поверхности коллектора;
- изменение массы щеток во время работы за счет износа;
- изменение силы нажатия пружин при изменении геометрических размеров щеток за счет износа;
- изменение частоты вращения коллектора тягового двигателя при изменении его нагрузки;
- изменение температурного состояния ЩКУ;
- использование дополнительных законов механики, определяющих внутреннюю динамику ЩКУ.

Учитывая, что аналитическая конструкция математической модели движения ЩКУ может оказаться системой дифференциальных уравнений высокого порядка) также необходимо оценить возможность применения правила акад. А.Ю.Ишлинского [22, стр.235, 332] при построении аналитической конструкции механической модели ЩК в сравнении с идеологией иерархического моделирования [23].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Микеров А.Г. Первый практически полезный электродвигатель Якоби // Control engineering россия #5 (59), 2015. URL: <https://controleng.ru/wp-content/uploads/73.pdf> (дата обращения 04.12.24)
2. Carbon Brush & Holder Technical Handbook Control engineering // URL: <https://www.comsol.ru/katalog/shetki/morgan/k/morgan2.pdf> (дата обращения 25.12.24)
3. ГОСТ Р 57700.37-2021. Цифровые двойники изделий. -Введ. 2022-01-01. М.: Изд-во стандартов, 2021.
4. Глущенко, М. Д. Математическая модель механических свойств щеточно-коллекторного узла электрической машины / М. Д. Глущенко, В. В. Зеленов // Техника и технология. 2007. № 3. С. 35-38.
5. Щуров, Н. И. Повышение надежности тягового электродвигателя карьерного самосвала для угольной промышленности / Н. И. Щуров, О. А. Филина, Б. В. Малоземов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2023. № 10-1. С. 245-260. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_101\_0\_245.
6. Найден, С. Н. Разработка метода и средств диагностирования состояния коммутации тяговых двигателей карьерных самосвалов в условиях эксплуатации: дисс... канд. техн. наук. Омск, 2021. 135 с.
7. Повышение коммутационной устойчивости коллекторных тяговых электродвигателей карьерных автосамосвалов / В. В. Харламов, П. К. Шкодун, Ю. В. Москалев, С. Н. Найден. Омск: ООО "Амфора", 2022. 168 с. ISBN 978-5-6048454-8-6.
8. Кулешов А.А. Анализ признаков и обоснование критериев вибродиагностики узлов карьерных автосамосвалов / А.А. Кулешов, А.А. Беликов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2000. №1. С.206-208.
9. Albert, W. A. J. (1838) "Über Treibseile am Harz". Archive für Mineralogie Geognosie Bergbau und Hüttenkunde, vol. 10, pp. 215-234.
10. Miller, K. J., Mohamed, H. J., and de los Rios, E. R. Fatigue Damage Accumulation Above and Below the Fatigue limit // the Behaviour of Short Fatigue Cracks, EGF Pub. 1 (Edited by K. J. Miller and E. R. de los Rios) t986, Mechanical Engineering Publications, London, pp. 491—511.
11. Паначев, И. А. О трещинообразовании в металлоконструкциях большегрузных автосамосвалов при эксплуатации на разрезах Кузбасса / И. А. Паначев, И. В. Кузнецов // Вестник Инженерной школы Дальневосточного

- федерального университета. – 2018. – № 3(36). – С. 14-21. – DOI 10.5281/zenodo.1408217. – EDN OZJGUZ.
12. Matías Valenzuela Guzmán and M. Aníbal Valenzuela. Integrated Mechanical–Electrical Modeling of an AC Electric Mining Shovel and Evaluation of Power Requirements During a Truck Loading Cycle. *IEEE transactions on industry applications*, vol. 51, no. 3, may/june 2015. pp.2590-2599.
13. Орленко, А. И. Особенности математического моделирования движения элементов коллекторно-щеточного узла тягового электродвигателя с учетом возможностей нарушения контакта / А. И. Орленко, А. В. Елисеев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2017. № 4(56). С. 167-175. DOI 10.26731/1813-108.2017.4(56).167-175.
14. Орленко, А. И. Особенности математического моделирования в задачах надежности токосъема в коллекторно-щеточных узлах электрических тяговых двигателей / А. И. Орленко, А. В. Елисеев, С. В. Елисеев // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22, № 5(136). С. 46-64. DOI 10.21285/1814-3520-2018-5-46-64.
15. Степанов, Е. Л. Методы и средства повышения ресурса щеток тяговых электродвигателей: специальность 05.09.01 "Электромеханика и электрические аппараты": автореферат дисс... канд. техн. наук. Новосибирск, 2010. 20 с.
16. Филина, О. А. Методы и средства повышения надежности щеточно-коллекторного узла тяговых электродвигателей постоянного тока: дисс... канд. техн. наук. Новосибирск, 2023. 175 с.
17. Саблюков, В. Ю. Модели, методы и средства для оценки механического состояния скользящего контакта электрических машин: дисс ... канд. техн. наук. Томск, 2008. 162 с.
18. Харламов, В. В. Оценка влияния профиля коллектора машины постоянного тока на работу скользящего контакта / В. В. Харламов, Д. И. Попов, М. Ф. Байсадыков // Омский научный вестник. – 2016. – № 4(148). – С. 62-65.
19. Пановко Я.Г. Основы прикладной теории колебаний и удара. Л.: Машиностроение, 1976. 320 с.
20. Пановко Я.Г. Устойчивость и колебания упругих систем / Пановко Я.Г., Губанова И.И. // М., Наука, 1987. – 352 с.
21. Sergey E. Lyshevski. Electromechanical Systems and Devices // 2008 by Taylor & Francis Group, LLC. ISBN 978-1-4200-6972-3
22. Кузовков Н.Т. Теория автоматического управления, основанная на частотных принципах. М., Оборонгиз, 1960. 438 с.
23. Wei Sun, Jianan Du, Lintao Wang, Penglong Luan, And Jie Li. Hierarchical Modelling and Dynamic Analysis of Hoist System in Electric Mining Shovel. Shock and Vibration. Volume 2018. ID 5017564, 15 pages. <https://DOI.org/10.1155/2018/5017564>