

*Розглянуто питання контролю швидкості рудничних електровозів з метою підвищення безпеки руху внутрішнього транспорту. Проведено аналіз існуючих швидкостемірів, що використовують безпосередній зв'язок з обертовими елементами тягової електромеханічної передачі електровозу. Для забезпечення високої надійності швидкостеміра запропоновано застосувати спосіб безсенсорного контролю швидкості руху електровозів шляхом використання лише електричних параметрів режимів роботи тягових електричних двигунів, що дозволить підвищити точність вимірювання, надійність та довговічність контролюючого пристрою*

*Ключові слова: рудничний електровоз, контроль, безсенсорний швидкостемір, надійність, електричні параметри, датчик*

*Рассмотрены вопросы контроля скорости рудничных электровозов с целью повышения безопасности движения внутришахтного транспорта. Проведен анализ существующих скоростемеров, использующих непосредственную связь с вращающимися элементами тяговой электромеханической передачи электровоза. Для обеспечения высокой надёжности скоростемера предложено применить способ бездатчикового контроля скорости движения электровозов путём использования только электрических параметров режимов работы тяговых электрических двигателей, что позволит повысить точность измерения, надёжность и долговечность контролирующего устройства*

*Ключевые слова: рудничный электровоз, контроль, бездатчиковый скоростемер, надёжность, электрические параметры, датчик*

## О БЕЗДАТЧИКОВОМ СПОСОБЕ КОНТРОЛЯ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ РУДНИЧНЫХ ЭЛЕКТРОВОЗОСОСТАВОВ

**О. Н. Синчук**

Доктор технических наук, профессор\*

E-mail: speet@ukr.net

**Э. С. Гузов**

Кандидат технических наук, доцент\*

**И. О. Синчук**

Кандидат технических наук, доцент\*

**В. Л. Дебелый**

Доктор технических наук, председатель наблюдательного совета\*\*

E-mail: amplituda@gmail.com

**Л. Л. Дебелый**

Кандидат технических наук, заместитель председателя правления\*\*

\*Кафедра автоматизированных электромеханических систем в промышленности и транспорте

ГВУЗ «Криворожский национальный университет»

ул. XXII Партсъезда, 11,

г. Кривой Рог, Украина, 50027

\*\*ЧАО ПКФ «Амплитуда»

ул. Ходаковского, 1, г. Донецк, Украина, 83023

### 1. Введение

Доставка полезных ископаемых, добываемых подземным способом в отечественных рудниках и шахтах, до места подъёма их на дневную поверхность в подавляющем объёме осуществляется рельсовыми локомотивосостовами (ВШТ), ведомыми, как правило, специальными типами двосных электровозов сцепной массой 7–28 т [1, 2]. В настоящее время на шахтах и рудниках Украины эксплуатируются около 4-х тысяч таких электровозов (ЭВ) 20-ти видов, которые в практике эксплуатации именуется как рудничные [2]. К сожалению, конструктивно для этих типов электровозов характерным является отсутствие в системах управления их тяговыми электромеханическими системами, устройств контроля тяговых параметров при движении электровозосоставов [2].

Последнее является причиной низкой технологической надёжности, сроков межремонтной эксплуатации электрооборудования электровозов и, особенно,

тяговых электрических двигателей (ТЭД). Помимо этого, как следствие, очевиден и тот факт, что в последние годы увеличивается число травм в процессе эксплуатации ВШТ отечественных шахт [5, 6]. В силу этого очевидно, что необходимо принятие комплекса как организационных, так и технических мер по соблюдению условий контроля (мониторинга) текущих электрических и технологических параметров рудничных электровозосоставов при их движении в подземных шахтных выработках [7–11].

Одним из параметров, который необходимо контролировать и, более того, при необходимости воспроизвести по записи, является скорость движения электровозосостава. Как известно [12], и о чем будет отмечено далее, этот параметр жестко регламентирован ПТБ дифференцированно по участкам подземного технологического маршрута движения электровозосоставов.

Так в железорудных шахтах скорости движения ЭВ ограничиваются следующими значениями, км/ч [12]:

- по квершлагу для груженых составов – 10,
- по штреку лежачего бока – 5,
- висячего бока – 3,
- на стрелках и закруглениях – 3,
- возле опрокидывателя – 2.

При этом важнейшим условием обеспечения безопасности является ограничение скорости движения электровозосоставов (ЭВ) по условию допустимой длины тормозного пути, которая при перевозке грузов не должна превышать 40 м, а при перевозке людей – 20 м [12]. Тормозной путь ЭВ рассчитывается для условий наихудшего варианта – движение груженого состава под уклон к стволу. Это наиболее опасная часть маршрута, где скорость движения ограничивается до 10 км/ч, хотя по тяговым возможностям электровозосостав может развивать гораздо большую скорость.

То есть, очевидно, что к тому же подтверждено и соответствующими «Правилами...» [12] для безопасной эксплуатации транспорта в подземных шахтных условиях необходим постоянный контроль скорости движения.

---

## 2. Анализ литературных данных по существующим методам и способам контроля скорости движения электровозов

---

В разные временные периоды развития рудничных типов электровозов разрабатывались и эксплуатируются вплоть до настоящего времени целая «линейка» устройств контроля скорости движения локомотивосоставов в т. ч. шахтных [1,2]. Так, в [2] рассматриваются варианты скоростемеров, устанавливаемых на рудничных электровозах типа 10КР, 14КР производства Александровского машиностроительного завода (Россия). Скоростемер состоит из двух блоков.

Первый блок представляет собой датчик-генератор с постоянными магнитами. При вращении ротора датчик генерирует ток, величина которого пропорциональна скорости вращения.

Второй блок – магнитный тахометр, который воспроизводит эти токи и показывает скорость движения электровоза на пульте управления машиниста. Датчик устанавливается на крышке редуктора тяговой передачи электровоза и соединяется с шестерней редуктора посредством собственной шестерни. Как видим уже даже априорно, из вышеизложенного очевидна сложность такого устройства.

Как следует из данных [7], в рудничных электровозах типа LG производства фирмы ASEA (Швеция) для контроля скорости движения электровозов используется два варианта. Первый – это когда датчики устанавливаются на валу редуктора тяговой передачи, и второй – когда датчики встроены в сами тяговые двигатели.

Оба эти способа обладают тем же комплексом недостатков, как и те, которые были приведены ранее.

Для контроля скорости движения отечественных ЭВ в настоящее время также применяется ряд других устройств, в основе которых, по сути, лежит контроль частоты вращения тяговых электрических двигателей или колёсных пар с последующим пересчётом в скорость движения электровоза [1, 2]. К таковым, в частности, относится скоростемер СР-35 [2]. Разработаны

также более совершенные скоростемеры, использующие датчики Холла и не требующие непосредственной связи с движущимися элементами тяговой передачи электровоза [2].

Однако, если для условий локомотивов, эксплуатируемых в наземных условиях, как первые, так и вторые вышеотмеченные варианты систем контроля в той или иной степени еще приемлемы, то для подземных условий их использования с достижением требуемой эффективности проблематично [11]. Эта проблема связана, прежде всего, с тем, что ремонт и обслуживание таких систем в условиях шахт весьма затруднителен и нетехнологичен, а нередко и невозможен. Т. е. очевидна необходимость разработки новых современных способов контроля скорости движения электровозов для условий шахт и рудников.

---

## 3. Цель и задачи исследований

---

Целью исследований является разработка эффективного бездатчикового способа контроля скорости движения электровозов в подземных выработках шахт. Для достижения данной цели необходимо решение следующих задач:

- анализ и оценка работоспособности существующих систем и типов скоростемеров для контроля скорости движения рудничных двососных электровозов;
- разработка бездатчиковой структурной схемы скоростемера с одновременной индикацией токов тяговых электрических двигателей электровозов.

---

## 4. Структура строения и направления усовершенствования конструкции датчиков скоростемеров рудничных электровозов

---

### 4. 1. Строение датчика скорости

Как известно [1–3, 8, 10, 11] ныне эксплуатируемые скоростемеры, как правило, состоят из датчика, размещаемого в редукторе, блока индикации, размещаемого в кабине машиниста, и соединительных проводов. Питание скоростемера осуществляется от бортового стабилизированного блока питания 24 В.

Типовая схема установки датчика скорости приведена на рис. 1. Для установки и крепления датчика в крышке редуктора сверлятся необходимые отверстия (рис. 1, а). Датчик размещается перпендикулярно вал-шестерне на расстоянии  $2 \pm 0,4$  мм от верхней кромки зуба (рис. 1, б). Зазор регулируется путём ввинчивания или вывинчивания датчика и фиксируется контргайкой. Кабель датчика для передачи информации подключается к блоку индикации в кабине машиниста.

В качестве датчика применяется магниточувствительный элемент Холла. При прохождении вершины зуба шестерни около торца датчика, в нём образуется прямоугольный импульс, равный напряжению питания, в интервале между зубьями напряжение на выходе равно 0. Блок индикации выполнен на базе процессора, который обеспечивает подсчёт количества импульсов в единицу времени и преобразует считываемую информацию в параметры скорости и пройденного пути, выдавая их на светодиодный инди-

катор. При этом параметр пройденного пути хранится в энергонезависимой памяти.

Перед установкой скоростемера необходимо проверить техническое состояние редукторной группы, которое должно соответствовать соответствующим требованиям [12]. При этом важным моментом является состояние подшипников и регулировка промежуточного вала.

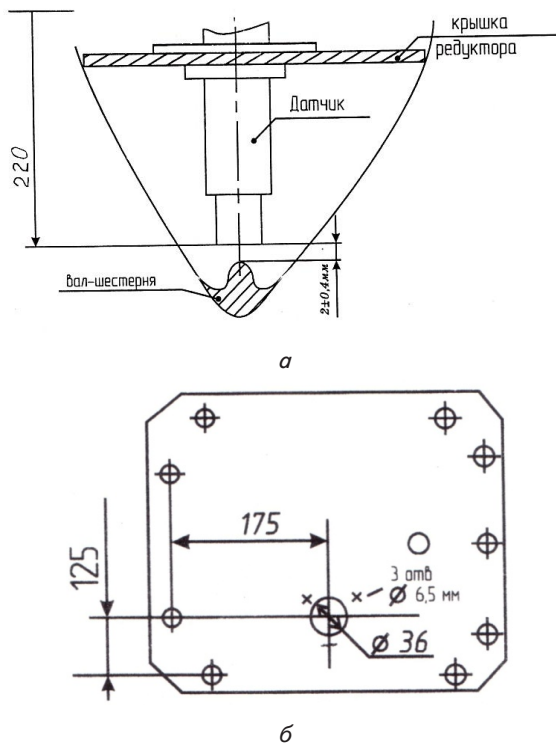


Рис. 1. Схема установки датчика: а – размещение датчика относительно вал-шестерни; б – доработка крышки редуктора для крепления датчика

В соответствии с требованиями и гарантией заводов изготовителей таких датчиков, необходимо периодически очищать наконечник датчика скорости скоростемера от частиц железа, образующихся в результате износа редуктора. Признаком необходимости очистки является сбой в показаниях скоростемера. При отсутствии показаний скоростемера в одном из направлений движения, необходимо периодически производить проверку настройки подшипников промежуточного вала, так как люфт в подшипниках может привести к поломке элементов датчика.

Все, или практически все, из вышеупомянутых требований по обслуживанию в требуемом заводом изготовителем объеме, в силу объективных причин, а точнее по невозможности их выполнения в шахтах, не выполняются, что естественно приводит к неточности показаний и частой поломке скоростемеров данных конструкций.

#### 4. 2. Пути совершенствования существующих датчиков скорости

Как следует из предыдущего раздела, описанная конструкция данного скоростемера, и ему подобных конструкций, имеет ряд недостатков:

- необходимо периодически очищать наконечник датчика;
- необходимо постоянно контролировать состояние подшипников редуктора;
- необходимо регулировать положение промежуточного вала;
- необходимо учитывать износ шестерни;
- датчик вместе с редуктором крепится на оси колёсной пары и работает в условиях жесточайшей вибрации и ударов.

В силу таких недостатков на практике это приводит к тому, что большинство электровозов, эксплуатируемых в отечественных шахтах, работают без скоростемеров, что является серьезным нарушением правил ТБ и ТЭ при эксплуатации ВШТ в подземных условиях [12].

По мнению авторов несколько улучшить работу таких датчиков можно путём размещения в редукторе тяговой передачи электровоза постоянного магнита для сбора частиц железа, образующихся в результате износа движущихся механических частей редуктора. При этом не потребуется периодически очищать наконечник датчика от металлических загрязнений. Одновременно это повысит в целом надёжность работы такого ответственного узла электровоза как редуктор.

Возможно также повысить надёжность работы датчика путём размещения его в тяговом двигателе при изготовлении последнего, но это еще более усложнит процедуру обслуживания и ремонта ТЭД. А главное – и первое, и второе из вышеизложенных мероприятий не позволит достичь требуемого эффекта [9, 11].

### 5. Разработка способа бездатчикового контроля скорости и его техническая реализация

Надёжность скоростемера можно многократно повысить, если применить метод бездатчикового контроля скорости, используя только электрические параметры режимов работы тяговых электрических двигателей.

Известно [1, 3], что для ТЭД последовательного возбуждения значения тока и напряжения однозначно определяют скорость вращения. В общем случае частота вращения тягового электрического двигателя равна:

$$\omega = \frac{U_{я} - I \cdot r_{я}}{C_{\omega} \cdot \Phi}, \tag{1}$$

где  $U_{я}$  – напряжение на якоре, В;  $I$  – ток якоря и обмотки возбуждения, А;  $r_{я}$  – сопротивление обмотки якоря, Ом;  $\Phi$  – магнитный поток;  $C_{\omega}$  – конструктивный коэффициент.

В электрической тяге принято использовать линейную скорость электровоза:

$$v = \frac{U_{я} - I \cdot r_{я}}{C_v \cdot \Phi}. \tag{2}$$

В этом выражении изменяется лишь значение коэффициента  $C_v$ .

Для ТЭД последовательного возбуждения магнитный поток  $\Phi = f(I)$ , тогда

$$v = \frac{U_{я} - I \cdot r_{я}}{C_v \cdot f(I)} \tag{3}$$

Введём некоторые упрощения, приемлемые для рабочего диапазона режимов. Магнитный поток имеет сложную зависимость от тока в связи с насыщением стали, но с достаточной точностью эта зависимость может быть выражена гиперболой с показателем степени  $x < 1$ , т. е.  $\Phi \approx I^x$ . Можно также пренебречь величиной  $U_{я} \gg I \cdot r_{я}$ . Тогда выражение (3) преобразуется:

$$v = \frac{U_{я}}{k \cdot I^x} \tag{4}$$

Используя электромеханическую характеристику тягового двигателя и задаваясь значениями тока  $I$  можно определить соответствующие скорости  $v$  и вычислить значения  $k \cdot I^x$ . Расчёты показывают, что для различных характеристик показатель степени  $x = 0,4 - 0,6$ . Если определено значение  $x$ , то значение связующего коэффициента  $k$  равно:

$$k = \frac{U_{я} - I \cdot r_{я}}{v \cdot I^x} \tag{5}$$

Для иллюстрации на рис. 2 приведены электромеханические характеристики тягового электрического двигателя ДТН – 45/27 электровоза К14 [2]. При этом скорость движения электровоза вычисляется по формуле (4) при значении показателя степени  $x = 0,5$ .

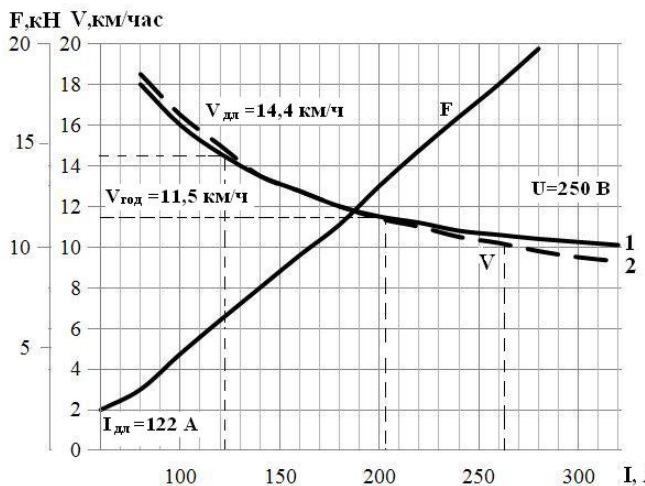


Рис. 2. Электромеханическая характеристика тягового двигателя ДТН-45/27 рудничного электровоза К14: 1 – фактическая; 2 – рассчитанная по предлагаемой методике

В ходе расчетов установлено, что в рабочем диапазоне токов и скоростей погрешность, обусловленная неточностью методики, не превышает 5 %, что в данном случае приемлемо. При токах  $I_6 > 260$  А тяговые усилия превышают допустимые по условиям сцепления и этот диапазон представляет скорее лишь теоретический интерес [11].

Предложенный способ бездатчикового контроля скорости может быть реализован с помощью измери-

тельного блока, способного выполнять вычислительные функции – рис. 3.

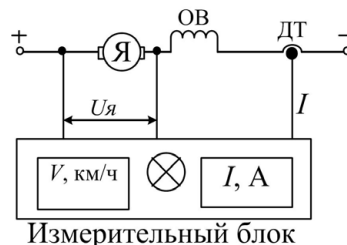


Рис. 3. Структурная схема скоростемера: Я, OB – соответственно якорь и обмотка возбуждения тягового электрического двигателя; и ДТ – датчик тока

На вход измерительного блока пульта управления машиниста электровоза подаётся напряжение на якорь  $U_{я}$  и значение тока каждого из двух тяговых двигателей  $I$ . В качестве датчика тока ДТ может использоваться измерительный шунт или другой вид датчика. Измерительный блок производит вычисление текущей скорости движения электровоза согласно уравнению (4) и выдаёт значение скорости на табло или регистрирующий прибор. При превышении скорости выше допустимого значения загорается сигнальная лампа. Также на табло или прибор выводится значение тока двигателя для информирования машиниста о текущей нагрузке [11].

Важно также и то, что все присоединения бездатчикового скоростемера выполняются в кабине машиниста, и при этом не требуется доработка механических конструкций тяговой передачи, регулировка элементов редуктора, и т. п.

Точную настройку скоростемера необходимо производить лишь для диапазона средних скоростей (скорость продолжительного режима) на испытательном стенде завода-изготовителя электровозов или ремонтного предприятия в процессе монтажа. В ходе эксплуатации бездатчиковый скоростемер не требует никаких регулировок и обслуживания, что снижает соответствующие материальные затраты.

Ожидаемо-достаточная высокая надёжность бездатчикового скоростемера будет способствовать повышению безопасности работы шахтного электровозного транспорта.

## 6. Выводы

На основании анализа соответствия показателей уровней реальной эксплуатации шахтных электровозов с системами датчикового контроля скорости их движения и требований к ним со стороны ПТБ и ПТЭ можно сделать следующие обобщающие выводы:

– эксплуатируемые в структурах тяговых электромеханических систем отечественных рудничных двососных электровозов системы датчикового контроля скорости движения обладают большой погрешностью в показаниях и низкой надёжностью, что приводит к недопустимой по требованиям ПТБ и ПТЭ их неработоспособности;

– пропонувана структурна схема скоростемера для вимірювання та індикації швидкості руху електровоза, з одночасною індикацією струмів тягових електричних двигачів включає в себе виміри-

тельний шунт, датчик струму та вимірний блок. Рекомендовано для використання в рудничних, а також в інших типах електровозів та електрифікованих видів транспорту.

#### Література

1. Волотковський, С. А. Руднична електровозна тяга [Текст] / С. А. Волотковський. – М.: Недра, 1991. – 389 с.
2. Бутт, Ю. Ф. Шахтний підземний транспорт: справочне видання. Шахтний локомотивний та рельсовий транспорт [Текст] / Ю. Ф. Бутт, В. Б. Грядущий, В. Л. Дебелый, А. Н. Коваль, А. Л. Фурман, В. М. Шука, В. А. Яценко; под общ. ред. Б. А. Грядущего. Т. 1. – Донець: “ВИК”, 2009. – 481 с.
3. Розенфельд, В. Е. Теорія електричної тяги [Текст] / В. Е. Розенфельд, И. И. Исаев, Н. К. Сидоров, М. С. Озеров. – М.: Транспорт, 1995. – 294 с.
4. Wheel slip control in ABS brakes using gain scheduled optimal control with constraints [Electronic resource] / Available at: [http://www.itk.ntnu.no/ansatte/Johansen\\_Tor.Arne/thesisIdarPetersen.pdf](http://www.itk.ntnu.no/ansatte/Johansen_Tor.Arne/thesisIdarPetersen.pdf)
5. Friction in Wheel – Rail Contacts. [Електронний ресурс] / Режим доступу: [http://www.utwente.nl/ctw/tr/Research/Publications/PhDTheses/Thesis\\_Popovici.pdf](http://www.utwente.nl/ctw/tr/Research/Publications/PhDTheses/Thesis_Popovici.pdf).
6. Engel, B. Verschlei Breduzierende Radschlupdregelung mit holier Kraftschlussausnutzung [Text] / B. Engel, H. Beck, J. Alders // Elektrische Bahnen. – 1998. – Vol. 96, Issue 6. – P. 201–209.
7. Сінчук, І. О. Електротравматизм і шляхи його зменшення при експлуатації електрифікованих видів транспорту на підземних гірничорудних підприємствах [Текст] / І. О. Сінчук, Є. І. Скапа // Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації : Зб. наук. науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів. – Кременчук, 2011. – С. 338–339.
8. Bertil, O. Computer-controller ore transformation at the LKAB mine in Kiruna [Text] / O. Bertil. – Sweden Information of ASEA, 2002. – 212 p.
9. Синчук, О. Н. Теоретические аспекты построения структуры системы мониторинга состояния электрических приводов тяговых электротехнических комплексов [Текст] / О. Н. Синчук, В. Ю. Захаров, Л. В. Сменова // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. Вестник НТУ «ХПИ». – 2013. – Вып. 36 (1009). – С. 142–145.
10. Жеребкин, Б. В. Система векторного управления электроприводом рудничных электровозов с использованием аппарата нечеткой логики [Текст]: автор. дис. ... канд. тех. наук 05.09.03 / Б. В. Жеребкин // Электротехнические комплексы и системы. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный горный институт им. Г.В. Плеханова, 2005. – 19 с.
11. Синчук, О. Н. Каналы и их параметры для передачи информации от системы мониторинга тяговых электрических систем шахтных электровозосоставов [Текст] / О. Н. Синчук, В. О. Чёрная, Э. С. Гузов, И. О. Синчук, Р. А. Пархоменко, Л. В. Сменова // Електромеханічні та енергозберігаючі системи. – 2012. – Вып. 4/2012 (20). – С. 43–48.
12. НПАОП 10.0 – 1.01 – 05. Правила безпеки у вугільних шахтах [Текст] / Луганськ: Копіцентр, 2005. – 196 с.