

УДК 622.232.83

Д.И. Шишлянников¹, М.И. Апасов¹, Е.О. Вагин²**D.I. Shishlyannikov¹, M.I. Apasov¹, E.O. Vagin²**¹ Пермский национальный исследовательский
политехнический университет² Региональный канатный центр¹ Perm National Research Polytechnic University² Regional Rope Center

ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТРАНСМИССИИ

TEST STAND FOR DIAGNOSING TRANSMISSION

Обоснована актуальность разработки и внедрения автоматизированных бортовых систем диагностирования узлов и деталей горных машин очистных и проходческих механизированных комплексов. Указывается на необходимость эффективного использования информации от штатных датчиков и приборов, уже имеющихся в действующей технике, аппаратах и системах, для диагностирования узлов горных машин. Доказана перспективность и универсальность энергетического подхода к определению технического состояния и остаточного ресурса механических трансмиссий горнотранспортного оборудования. Представлена конструкция испытательного стенда с разомкнутым нагрузочным контуром, позволяющего выполнить оценку технического состояния механических трансмиссий по параметрам питания электропривода. Приведено описание измерительной системы стенда, обеспечивающей регистрацию электрических параметров приводного двигателя и нагрузочной машины (генератора) стенда. Обоснованы основные положения методики оценки технического состояния и остаточного ресурса механических трансмиссий выемочных и транспортных горных машин по изменению параметров питания электропривода. Представленные технические решения и методологические основы являются действенным инструментом в повышении эффективности работы инженерно-технических служб горнодобывающих предприятий при проведении профилактических мероприятий и переводе оборудования на систему обслуживания и ремонта по фактическому техническому состоянию.

Ключевые слова: механическая трансмиссия, диагностирование, ресурс, испытательный стенд, нагрузки, параметры питания электропривода, измерительные системы.

The urgency of the development and implementation of automated on-board diagnostic systems units and parts of mining machines and sewage tunnel mechanized complexes. Indicates the need for effective use of staff gauges and instruments already available in the existing technology, devices and systems for diagnosing nodes mining machines. Proved promising and versatile energy approach to the definition of a technical condition and remaining life of mechanical transmissions of mining equipment. Shows the structure of the test stand with an open load circuit, allows you to evaluate the technical condition of mechanical transmissions in the parameters of the electric power. The description of the measurement system of the stand, providing recording of electrical parameters of a drive motor and the load machine (generator) stand. Substantiated the main provisions of the methodology for assessing the technical condition and residual life of mechanical transmissions of excavation and transportation of mining machines to change the power settings of the drive. Provision of technical solutions and methodological foundations are an effective tool in improving the effectiveness of engineering and technical services during the mining operations of preventive measures and the transfer of equipment for system maintenance and repairs on the actual technical condition.

Keywords: manual transmission, diagnosis, resource testbench, load electric power options, measuring systems.

Для горнодобывающих предприятий актуальными остаются задачи обеспечения надежной работы технических машин проходческих и очистных комплексов, снижение затрат на их эксплуатацию, обслуживание и ремонт. Недостаточная точность оценки ресурса деталей и узлов механических трансмиссий горных машин, сложность и трудоемкость диагностирования приводят к возникновению аварийных отказов, устранение которых сопровождается длительными простоями оборудования. Комплексное решение задач повышения эффективности использования добычных и транспортных горных машин возможно посредством разработки и внедрения автоматизированных бортовых систем контроля технического состояния. В комплект таких систем должны входить методики анализа регистрируемых данных, научно-обоснованные диагностические параметры, алгоритмы предотвращения аварийных ситуаций, оповещения о недопустимом развитии событий с выдачей необходимых, соответствующих конкретной ситуации действий, технических решений или рекомендаций.

На горных предприятиях России и зарубежных стран накоплен огромный опыт эксплуатации горных машин и комплексов, оснащенных датчиками и бортовыми компьютерами для сбора информации о техническом состоянии оборудования. Основное назначение таких систем – оперативная передача объективной информации оператору и сервисным службам для ее использования в планировании и проведении более качественного технического обслуживания и ремонта техники. Однако анализ причин отказов, сбоев в устойчивости режимов работы горных машин в реальном масштабе времени весьма затруднителен. В связи с этим сложно принимать конкретные, адекватные реальным ситуациям оперативные решения.

Методов получения объективной информации о техническом состоянии оборудования много, но прежде всего необходимо эффективно использовать информацию от штатных датчиков и приборов, уже имеющихся в действующей технике, аппаратах и системах. Дополнительная информация, получаемая с использованием специальных диагностических средств, позволяет повысить достоверность и качество прогнозной оценки на ближайшую перспективу, что увеличивает эффективность технического обслуживания и ремонта горнотранспортного оборудования.

Идея технического решения. Известно, что постепенные и внезапные отказы оборудования, вызванные изнашиванием, деформацией и поломками деталей, можно описать с единой энергетической точки зрения. Исследования усталостного разрушения металлов показывают, что объем материала детали разрушается при достижении критического значения внутренней энергии. Следовательно, каждый элемент трансмиссии горной машины имеет свой энергоресурс, определяемый предельным количеством энергии K_k , которую могут рассеять элементы привода до поломки наиболее слабого элемента

при отсутствии сверхнормативных нагрузок. Значение энергоресурса имеет постоянную величину для каждой машины и рассчитывается по формуле

$$K_k = T_p \Delta P, \quad (1)$$

где T_p – ресурс привода, ч; ΔP – потери мощности в приводе, кВт.

Величина потерь мощности в приводе при нагрузках, не превышающих номинальные, может быть определена по формуле

$$\Delta P = P_x + aP_2, \quad (2)$$

где P_x – потери холостого хода, кВт; a – коэффициент, характеризующий интенсивность роста потерь мощности в приводе; P_2 – полезная мощность привода на исполнительном органе горной машины, кВт.

Потери P_x характеризуют постоянные потери мощности в приводе машины, не зависящие от нагрузки. Интенсивность роста диссипативных потерь имеет статическую и динамическую составляющие:

$$a = a_c + a_d = a_c + K_A \sigma_x = a_c + K_A K_V V_{II}, \quad (3)$$

где a_c – интенсивность потерь мощности в приводе при статической нагрузке; a_d – интенсивность потерь мощности в приводе при динамической нагрузке; K_A – интенсивность роста потерь мощности на единицу динамической составляющей нагрузки привода; K_V – интенсивность роста среднеквадратичного отклонения мощности σ_x на единицу скорости подачи V_{II} .

Теряемая в приводе общая энергия:

$$W_{II} = \int_0^t \Delta P(t) dt = W_{II} + W_p, \quad (4)$$

где W_{II} – энергия, превращаемая в тепло, кВт·ч; W_p – энергия, расходуемая непосредственно на потерю прочности элементов привода, кВт·ч.

Энергия, превращаемая в тепло, также участвует в разрушении деталей привода, так как нагрев снижает предел их прочности, несущую способность масляной пленки трущихся пар, пластичность материала во времени, изменяет посадочные размеры деталей, релаксацию напряжений в крепежных элементах. Таким образом, процесс накопления повреждений в элементах трансмиссии в период эксплуатации определяется суммарными потерями энергии:

$$W_{II} = W_{II} + W_p = W_{HT} + W_{HT} + W_{PT} + W_{PT}, \quad (5)$$

где W_{HT} – энергия диссипации, затрачиваемая на упругую деформацию трущихся поверхностей, кВт·ч; W_{HT} – тепловые потери энергии, кВт·ч; W_{PT} – часть диссипативной энергии внутреннего трения, расходуемая на усталостное разрушение

предельно пластически деформированного материала, кВт·ч; $W_{\text{пр}}$ – часть внешней энергии трения, расходуемой на износ, пластическое деформирование деталей привода, кВт·ч [1].

Потери энергии в приводе в зависимости от технического состояния и нагруженности элементов механической трансмиссии достигают 30 %.

Энергетический подход к определению ресурса как отдельных деталей, так и сложных машин универсален, а величина потерь мощности позволяет объективно оценить величину ресурса.

Наиболее перспективным методом оценки технического состояния и остаточного ресурса узлов механических трансмиссий является аппаратная диагностика систем приводов, основанная на компьютерном моделировании системы, использующая в качестве исходной информации сигналы отклика либо от штатных датчиков, либо от специально установленных на горной машине. При этом параметры изменения величины и характера мощностей, токов и напряжений приводных двигателей горных машин являются наиболее доступной и достоверной первичной информацией для такого рода систем диагностики. Дополнительная диагностическая информация от других датчиков способна уточнить или подтвердить техническое состояние объекта. Количество такой дополнительной информации определяется лишь ее разумной избыточностью [2, 3].

Однако для создания эффективной системы диагностики необходимо разработать научно обоснованные методики интерпретации имеющихся диагностических сигналов, а это возможно только при создании идеальных условий эксперимента на специальном стенде.

Конструкция и принцип работы стенда. На кафедре «Горная электромеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета совместно со специалистами ООО «Региональный канатный центр» (г. Пермь) и кафедры машиностроения Национального минерально-сырьевого университета «Горный» (г. Санкт-Петербург) был разработан и изготовлен стенд для опробования и уточнения основных положений методики диагностирования механических трансмиссий с электроприводом по потребляемому токам, напряжениям и мощностям.

Испытательный стенд с разомкнутым нагрузочным контуром (рис. 1) смонтирован на сварной раме 5 с установленными на ней трехфазным асинхронным электродвигателем 6, цилиндрическими двухступенчатыми редуктором 4 и мультипликатором 3. Статическая нагрузка на элементы стенда создается генератором постоянного тока 1, энергия которого гасится на сопротивлениях 11. Соединения валов осуществляются глухими фланцевыми муфтами 2. Измерительная аппаратура стенда размещена в электротехнических шкафах 8 и 10, соединенных посредством USB-кабеля с персональным компьютером 7. Приводной двигатель стенда подключен к сети переменного

тока через магнитный пускатель 9. Стенд дополнительно оснащен терморегистрирующей аппаратурой (тепловизор Fluke). Для оценки вибраций, возникающих при работе стенда, используется виброанализатор СД-12М.

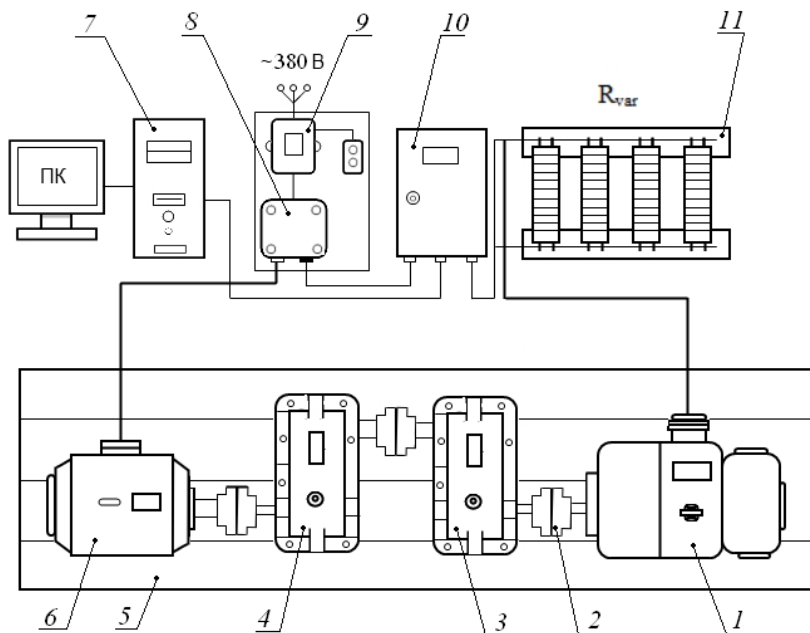


Рис. 1. Испытательный стенд для оценки технического состояния механизмов с электроприводом по потребляемым токам и мощностям

Измерительная система стенда (рис. 2) обеспечивает регистрацию текущих электрических параметров работы приводного двигателя АД и генератора Г: мгновенных значений фазных напряжений и токов. Величины фазных напряжений измеряются относительно линий трехфазной сети и средней точки, образованной соединением концов обмоток статора. Для измерительной цепи уровень напряжения снижен с помощью делителей напряжения Д1–Д4, собранных на постоянных проволочных прецизионных резисторах. Номинальная мощность рассеивания резисторов составляет 1 Вт, допустимое отклонение номинала сопротивления равно $\pm 0,1\%$. Делители обеспечивают кратность деления, равную 25. При подаче на входные клеммы делителя напряжение – 220 В, на выходе – 8,8 В.

Величины токов измеряются посредством измерительных шунтов Ш1–Ш4 класса точности 0,5, выполненных из манганина. Применение шунтов и делителей в качестве первичных преобразователей обеспечивает регистрацию сигналов в широком частотном диапазоне.

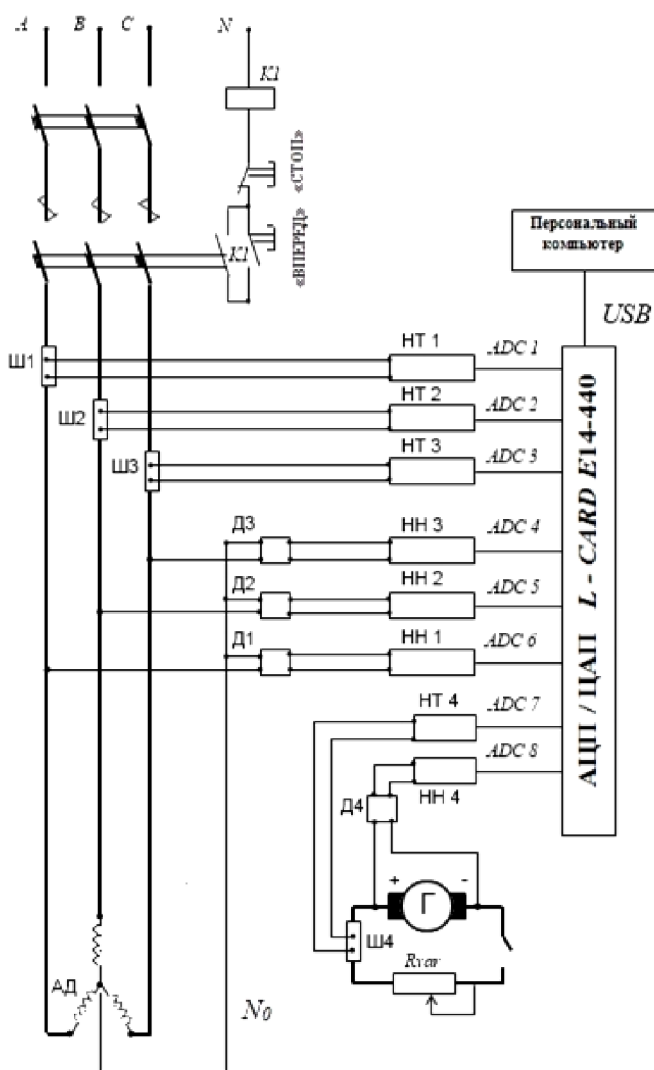


Рис. 2. Измерительная система стенда

Для преобразования сигналов от делителей и шунтов используются нормализаторы напряжения НН1–НН4 и тока НТ1–НТ4, обеспечивающие гальваническую развязку (вход/выход) 1500 В, полосу пропускания 10 кГц, точность преобразования 0,03 % и линейность передачи 0,01 %. Для измерительных каналов напряжения используются нормализаторы НН1–НН4 с входным диапазоном ± 10 В, для каналов измерения тока – нормализаторы НТ1–НТ4 с входным диапазоном сигнала ± 100 мВ. Выходные сигналы модулей имеют диапазон 0–10 В. Нулевой уровень входного сигнала соответствует +5 В на выходе нормализатора.

Аналого-цифровое преобразование аналоговых сигналов нормализаторов осуществляется внешним модулем АЦП/ЦАП L-Card E14-440. Коммутация нормализаторов с модулем АЦП осуществляется по каналам ADC1–ADC8. Модуль АЦП управляется с персонального компьютера и передает информацию по USB-кабелю.

При подключении к сети через пускатель с магнитной катушкой К1 крутящий момент двигателя передается на вал редуктора. Частота вращения вала двигателя – $n_{дв} = 1480$ об/мин, передаточное число редуктора – $z_1 = 10,32$. Посредством мультипликатора обеспечивается номинальная частота вращения вала генератора ($n_{дв} = n_{ген}$), развивающего тормозной момент

$$M_T = C_M \Phi I_{я}, \quad (6)$$

где M_T – тормозной момент; C_M – постоянная величина, зависящая от конструктивных особенностей генератора; Φ – поток, пропорциональный току возбуждения; $I_{я}$ – ток якоря.

Таким образом, испытательный стенд представляет собой физическую модель многоступенчатой механической трансмиссии горной машины, оснащенной электрическим приводным двигателем [4, 5].

Проведение экспериментов и анализ результатов испытаний. Методикой проведения экспериментальных исследований предусматривается регистрация электрических параметров приводного двигателя и генератора стенда при работе полностью исправных механических передач, а также при моделировании на стенде характерных дефектов редукторов горных машин: усталостного износа и поломки зубьев колес, разрушения тел качения в подшипниках, износа дорожек качения и т.д. Обработка результатов исследований осуществляется с использованием методов математической статистики и спектрального анализа.

Активная мощность, потребляемая двигателем из сети, равна сумме мощности, отдаваемой генератором на сопротивление R_{var} , и потерь мощности в механических передачах стенда:

$$P_{дв} = P_{ген} + \Delta P, \quad (7)$$

где $P_{дв}$ – активная мощность, потребляемая двигателем из сети, кВт; $P_{ген}$ – мощность, отдаваемая генератором на сопротивление, кВт.

Потери мощности в приводе стенда ΔP определяются линейной зависимостью (2). В соответствии с зависимостями (2) и (7) КПД привода стенда η определяется по формуле

$$\eta = \frac{P_{ген}}{P_{дв}} = \frac{P_{ген}}{P_{ген} + \Delta P} = \frac{1}{1 + a + P_x/P_{ген}}. \quad (8)$$

Параметры η , P_x и a являются показателями качества привода станда и характеризуют точность изготовления деталей, правильность центровки и сборки узлов. Чем выше контактная прочность и жесткость элементов привода станда, тем выше значение η и ниже P_x и a при заданной нагрузке. Таким образом, техническое состояние трансмиссии (и степень влияния на него моделируемых дефектов) может быть определено с достаточной точностью путем сопоставления текущих значений η , P_x и a с эталонными значениями полностью исправного привода.

Спектральный анализ записей токов и мощностей, потребляемых приводным электродвигателем, позволяет выявить частотные составляющие, характеризующий колебания кинематической цепи «генератор – мультипликатор – редуктор – двигатель». Основные частоты колебаний нагрузки привода станда изменяются от 2 до 25 Гц. Дефекты рабочих узлов и механических передач обуславливают возникновение переменных нагрузок, что вызывает появление новых спектральных составляющих. Непрерывное измерение величин переменных составляющих в спектрах тока и мощности, характеризующих конкретные дефекты в приводном электродвигателе и механической трансмиссии, с последующим анализом их изменений позволяет прогнозировать возможное время достижения контролируемыми величинами предельных значений [6].

Выводы. Представленный в статье анализ показывает перспективность разработки средств диагностирования механических трансмиссий горнотранспортного оборудования посредством контроля величины и характера изменения мощностей и токов, потребляемых приводными электродвигателями. Предлагаемые технические решения и методологические основы позволят наиболее просто реализовать автоматизированную оценку технического состояния и остаточного ресурса узлов горных машин, рационально организовывать ремонтные работы, а также контролировать качество их выполнения.

Список литературы

1. Методы оценки технического состояния и ресурса механических трансмиссий проходческо-очистного комбайна «Урал-20Р» / Н.В. Чекмасов, М.Г. Трифанов, Д.И. Шишлянников, С.Л. Иванов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – № 4. – С. 272–277.
2. Сумканов А.И., Зотов В.В., Кубрин С.С. Разработка методики оценки состояния оборудования очистных комплексов горных предприятий // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2012. – № 10. – С. 260–264.
3. К вопросу оценки ресурса элементов трансмиссии горных машин / А.А. Артемьев, В.С. Потапенко, С.Л. Иванов, Э.А. Кремчеев, А.А. Поддубная, А.С. Фокин // Горные машины и электромеханика. – 2007. – № 9. – С. 31–35.

4. Пилотная диагностика состояния трансмиссий горных машин по параметрам питания электропривода / С.Л. Иванов, М.А. Семенов, А.С. Иванов, А.А. Поддубная, А.С. Фокин // Записки Горного института. – 2008. – Т. 178. – С. 159–161.

5. Коломийцев М.Д. Эксплуатация горных машин и автоматизированных комплексов: учеб. пособие. – Л.: Изд-во ЛГИ, 1988. – 96 с.

6. Методика диагностирования механизмов с электроприводом по потребляемому току / А.В. Барков, Н.А. Баркова, А.А. Борисов, В.В. Федорищев, Д.В. Грищенко. – СПб., 2012. – 68 с.

Получено 11.03.2016

Шишлянников Дмитрий Игоревич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Горная электромеханика», горно-нефтяной факультет, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: 4varjag@mail.ru.

Апасов Максим Игоревич – студент, горно-нефтяной факультет, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: mt59@mail.ru.

Вагин Евгений Олегович – инженер-эксперт, ООО «Региональный канатный центр», e-mail: VaginEvgeny@gmail.com.