

10. Обеспечение безопасности водителей транспортных средств / В.С. Шкрабак, Е.Н. Христофоров и др. // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2008. № 7. С. 32-33.
11. Христофоров Е.Н. Совершенствование сельскохозяйственных транспортных средств // Техника в сельском хозяйстве. 2007. № 3. С. 47-49.
12. Силовой гидроцилиндр двустороннего действия: пат. 2278304 Рос Федерация / Е.Н. Христофоров, Е.Г. Лумисте и др.; опубл. 2006. Бюл. № 17.

References

1. Hristoforov E.N., Sakovich N.E., Sluchevskij A.M. *Povyshenie nadezhnosti gidro-privodov dorozhno-transportnyh i gruzopodzemnyh mashin* // *Mir transporta i tehnologicheskikh mashin*. 2014. № 1 (44). S. 62-68.
2. Hristoforov E.N., Sakovich N.E., Sluchevskij A.M. *Povyshenie nadezhnosti gidro-privodov* // *Sel'skij mehanizator*. 2013. № 12. S. 46-48.
3. *Teorija i praktika povysheniya bezopasnosti operatorov stroitel'nyh mashin* / E.N. Hristoforov, N.E., Sakovich N.E., A.M. Sluchevskij, Ju.V. Bezzub. Brjansk: Izd-vo Brjan-skaja GSHA, 2014.
4. Hristoforov E.N. *Prichiny travmatizma operatorov mobil'nyh mashin* // *Traktory i sel'skohozjajstvennye mashiny*. 2004. № 12. S. 39-40.
5. Hristoforov E.N. *Obespechenie bezopasnosti jekspluatacii samosval'nyh platform* // *Traktory i sel'skohozjajstvennye mashiny*. 2005. № 12. S. 30-31.
6. Hristoforov E.N. *Povyshenie bezopasnosti transportnyh rabot v kormoproizvodstve* // *Nauchno-tehnicheskij progress v zhivotnovodstve – perspektivnye napravlenija nauchnyh issledovanij po sozdaniju novoj tehniki i mashinnyh tehnologij, sovershenstvovanie informacionnogo obespechenija*. M.: Izd-vo GNU VNIIMZh Rossel'hoz akademii, 2006. T. 16, ch. 2. S. 164-169.
7. Hristoforov E.N., Shkrabak V.S., Sakovich N.E. *Teoreticheskie i prakticheskie aspekty uluchsheniya uslovij i ohrany truda operatorov sel'skohozjajstvennyh transportnyh sredstv*. Orel: FGNU VNIOT MSH RF, 2006. 203 s.
8. Hristoforov E.N. *Travmatizm operatorov mobil'nyh mashin v APK* // *Mehanizacija i jelektrifikacija sel'skogo hozjajstva*. 2007. № 2. S. 20-21.
9. Hristoforov E.N. *Bezopasnost' transportnyh rabot v APK* // *Traktory i sel'skohozjajstvennye mashiny*. 2007. № 6. S. 55-56.
10. *Obespechenie bezopasnosti voditelej transportnyh sredstv* / V.S. Shkrabak, E.N. Hristoforov i dr. // *Mehanizacija i jelektrifikacija sel'skogo hozjajstva*. 2008. № 7. S. 32-33.
11. Hristoforov E.N. *Sovershenstvovanie sel'skohozjajstvennyh transportnyh sredstv* // *Tehnika v sel'skom hozjajstve*. 2007. № 3. S. 47-49.
12. *Silovoj gidrocilindr dvustoronnego dejstvija*: pat. 2278304 Ros Federacija / E.N. Hristoforov, E.G. Lumiste i dr.; opubl. 2006. Bjul. № 17.

УДК 620.1.08

DOI: 10.52691/2500-2651-2021-88-6-49-55

**ВИБРАЦИОННЫЙ И ТЕПЛОВИЗИОННЫЙ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ
И ДИАГНОСТИКИ РОТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ
НА ОАО «БМЗ» УПРАВЛЯЮЩАЯ КОМПАНИЯ ХОЛДИНГА «БМК»**
*Vibration and Thermal Image Control Methods and Diagnostics of Rotary Equipment at
OJSC "BSW - Management Company of "BMC" Holding"*

Попов В.Б., канд. техн. наук, доцент, **Погуляев М.Н.**, канд. техн. наук, доцент,
Веппер Л.В., канд. техн. наук, доцент
Popov V.B., Pogulyaev M.N., Wepper L.V.

УО «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого»
Sukhoi State Technical University of Gomel

Аннотация. Статья посвящена использованию тепловизионного (термографического) и вибрационного методов диагностики для определения технического состояния узлов роторного оборудования на ОАО «БМЗ управляющая компания холдинга «БМК». Дана краткая характеристика рассматриваемых методов. Получены термограммы и спектры сигналов вибраций характерные для различных дефектов подшипников. Приведена термограмма поверхности диагностируемого оборудова-

ния, показывающая распределение температуры по его поверхности. Графически представлены результаты измерений, отражающие изменение среднеквадратичного значения уровня (СКЗ) вибрации и пиковой амплитуды (ПИК) вибрации по мере появления и развития дефекта подшипника. Установлено, что наилучшие результаты метод спектра огибающей даёт в том случае, если анализировать модуляцию не широкополосного сигнала, получаемого от акселерометра, а предварительно осуществить узкополосную фильтрацию сигнала. С помощью спектра, полученного методом ударных импульсов, был обнаружен дефект внутренней обоймы подшипника FAG 6234 электродвигателя 5E1KG02 мощностью 1600 кВт. В результате анализа данных, полученных различными методами, выявлено, что основными факторами, влияющими на срок службы подшипников, являются частота вращения и уровень вибрации машины.

Abstract. *The article is devoted to the use of thermal imaging (thermographic) and vibration diagnostic methods to determine the technical condition of the rotor equipment units at OJSC "BSW - Management Company of "BMC" holding". Brief characteristics of the considered methods are given. Thermograms and spectra of vibration signals typical of various bearing defects were obtained. The thermogram of the surface of the diagnosed equipment is given, showing the temperature distribution over its surface. The results of measurements are graphically presented, reflecting the change in the root-mean-square value of the level (RMS) of vibration and the peak amplitude (PEAK) of vibration as a bearing defect appears and develops. It has been established that the best results are obtained by the envelope spectrum method if the modulation of a non-broadband signal received from the accelerometer is analyzed, but a narrowband signal filtering is carried out beforehand. Using the spectrum obtained by the shock pulse method, a defect in the inner race of the FAG 6234 bearing of the 1600 kW electric motor 5E1KG02 was detected. As a result of the analysis of the data obtained by various methods, it was revealed that the main factors affecting the service life of the bearings are the rotational speed and the level of vibration of the machine.*

Ключевые слова: тепловизионная диагностика, вибродиагностика, вибросигнал, термограмма, спектр вибросигнала.

Key words: *thermal imaging diagnostics, vibration diagnostics, vibration signal, thermogram, vibration signal spectrum.*

Введение. Одной из наиболее важных и актуальных проблем современности является обеспечение надежности механизмов, машин и оборудования в любой отрасли промышленности. Это вызвано постоянным ростом объемов производства и повышением требований к качеству выпускаемой продукции.

Анализ проблем технической диагностики показывает на тенденцию объединения задач измерения и постановки состояния оборудования электрических машин уже на базе автоматизированной системы комплексной диагностики, не только выполняющей измерения, но и указывающей на конкретные дефекты работающего оборудования [1].

Актуальной является задача контроля состояния для определения рациональных сроков и видов ремонтных воздействий. В черной металлургии эта задача решалась путем контроля температуры, наблюдений за изменением вибрации и анализа шумов механизмов. Контроль осуществлялся специалистами высокой квалификации, оснащенными простейшими приспособлениями и многолетним практическим опытом. Зачастую это не приводило желаемым результатам и увеличивало затраты на содержание оборудования. В техническом обслуживании роторных машинный вибрационный мониторинг и диагностика занимают особое место в силу своих возможностей обнаружения изменений состояния задолго до наступления аварийной ситуации. Системы вибрационного мониторинга и вибрационной диагностики чаще всего заменяют всю совокупность средств внешнего контроля, если эти средства не входят в комплекс систем управления. Задачей систем вибрационной диагностики как стационарных, так и переносных, в отличие от систем мониторинга, является минимизация всех затрат на саму систему и ее обслуживание, а также на обслуживание и ремонт всей группы диагностируемых машин [2, 3].

Основная часть. Безопасная эксплуатация оборудования, повышение надежности и значительное увеличение ресурса машин, механизмов и оборудования невозможны в настоящее время без широкого применения методов и средств технической диагностики.

Среди множества методов диагностики оборудования, широко используемых на практике, важное место занимают тепловизионный (термографический) и вибрационный методы контроля. Главное преимущество указанных методов состоит в том, что они позволяют выполнять проверку оборудования в процессе его эксплуатации. В действительности работа установки в режиме нормальной эксплуатации является предпосылкой для выполнения точных измерений, таким образом, не требуется остановка производственного процесса.

Тепловидение – метод анализа пространственного и временного распределения тепловой энергии (температуры) в физических объектах, сопровождающийся построением термограмм.

Термографическая диагностика позволяет обнаруживать дефекты футеровки, труб, теплоизоляции зданий и сооружений, электродвигателей, контактных соединений, участки перегрузки кабелей, произвести оценку теплового состояния трансформаторов различного назначения, подшипниковых узлов, их уплотнений, и т. д. в процессе их эксплуатации. Данная диагностика очень удобна, информативна и экономична.

Суть тепловизионного метода диагностики заключается в бесконтактной регистрации температурного поля на поверхности объекта измерительной аппаратурой, построении и анализе термограмм с использованием ЭВМ для обнаружения дефекта, его классификации и последующего принятия решения. Наличие дефекта при такой диагностике характеризуется резким повышением температуры в дефектной зоне по сравнению с качественными областями.

Методика тепловизионной диагностики. Для определения начальных условий диагностики измеряются параметры окружающей среды и поверхности диагностируемого оборудования методом бесконтактного измерения температуры с помощью тепловизора. Далее производится регистрация температурных полей на термограмме.

На основе технической документации на диагностируемое оборудование и приведенных значений измерений производится сравнение термограмм с конструктивными особенностями и техническими характеристиками оборудования;

В результате анализа обнаруженных тепловых аномалий на поверхности диагностируемого оборудования определяется степень его дефектности и характеристики выявленных дефектов (рис. 1).

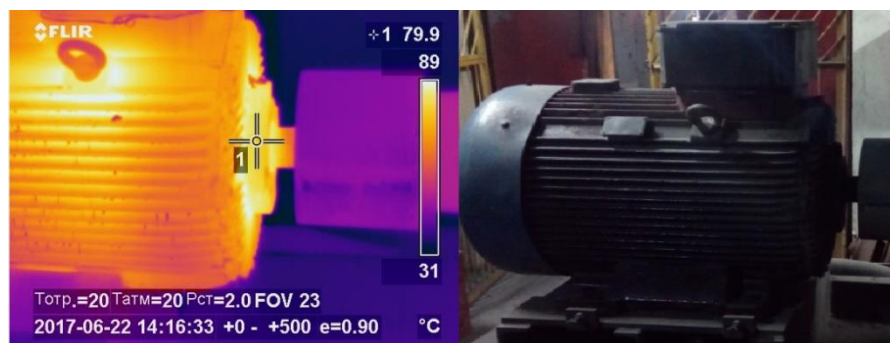


Рисунок 1 - Контроль температуры подшипников электродвигателя

Измерение вибрации стало основой контроля технического состояния оборудования. Для этого вначале использовались механические виброметры, измеряющие амплитудное значение виброперемещения, в дальнейшем большое значение получил контроль виброскорости на базе электронных приборов.

Вибродиагностика, так же как и тепловизионный метод, является важным эффективным способом неразрушающего контроля технического состояния узлов роторного типа, позволяет выявить явно выраженные (дисбаланс, расцентровку, не достаточную жесткость опор), зарождающиеся дефекты подшипниковых узлов, дефекты электромагнитной системы электрической машины и другие.

Для оценки технического состояния и диагностики оборудования используются следующие методы вибродиагностики: метод «ПИК-фактора»; метод по спектру вибросигнала; метод спектра огибающей; метод ударных импульсов.

Метод ПИК-фактора. Метод ПИК-фактора используется для контроля за техническим состоянием подшипников [1, 2]. По данному методу необходимо иметь виброметр, позволяющий измерять два параметра вибросигнала: среднеквадратичное значение уровня (СКЗ) вибрации, т.е. энергию вибрации и пиковую амплитуду (ПИК) вибрации. Отношение двух этих параметров ПИК/СКЗ, называется ПИК – фактором.

В осциллограмме нового, хорошо смазанного, подшипника присутствует стационарный сигнал шумового характера. С течением времени, по мере появления дефектов на деталях подшипника, в сигнале начнут появляться отдельные, короткие амплитудные пики, соответствующие моментам соударения дефектов.

В дальнейшем, с развитием дефекта, сначала увеличиваются амплитуды пиков, потом постепенно увеличивается и их количество. Например, дефект, появившись на одном из шариков, создаёт впоследствии раковину на кольце, с него она переносится на другой шарик, дефекты шариков начинают вырабатывать сепаратор и т.д. до полного разрушения.

Если изобразить результаты измерений на графике, мы увидим зависимости, показанные на рисунке 2. Сначала, по мере появления и развития дефекта, нарастает функция ПИК, а СКЗ меняется очень мало, поскольку отдельные, очень короткие амплитудные пики практически не меняют энергетические характеристики сигнала.

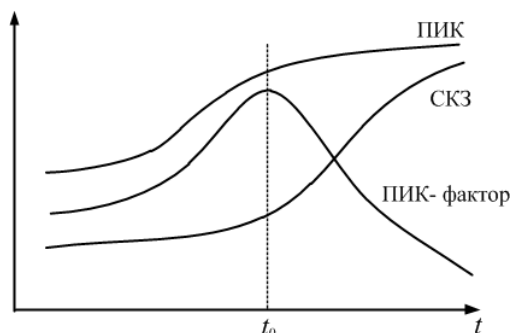


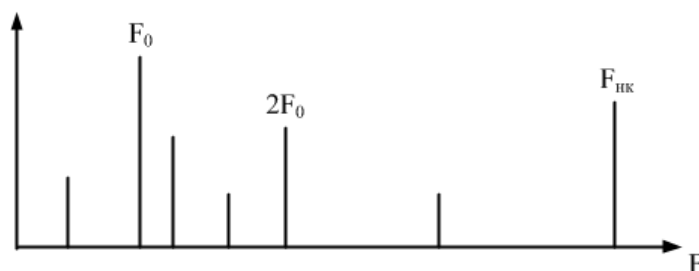
Рисунок 2 - Результаты измерений по методу ПИК-фактора

В дальнейшем, по мере увеличения амплитуд и количества пиков, начинает увеличиваться энергия сигнала и СКЗ вибрации возрастает.

Отношение ПИК/СКЗ из-за временного сдвига между ними, имеет явно выраженный максимум на временной оси (рис. 2). На этом и основывается метод ПИК - фактора.

Метод по спектру вибросигнала. Метод по спектру вибросигнала базируется на анализе спектра вибрации – выявлении периодичности (частоты) появления амплитуды сигнала и по частотному составу спектра (рис. 3) можно идентифицировать возникновение и развитие дефектов подшипника.

Каждому дефекту на элементах подшипника (тела качения, внутреннее и наружное кольцо, сепаратор), соответствуют свои частоты, которые зависят от кинематики подшипника и скорости его вращения.



F_0 – частота вращения; $F_{нк}$ – частота перекатывания тел качения по наружному кольцу подшипника

Рисунок 3 - Частотный состав спектра метода по спектру вибросигнала

Наличие той или иной частотной составляющей в спектре сигнала говорит о возникновении соответствующего дефекта, а амплитуда этой составляющей – о глубине дефекта.

Метод спектра огибающей. Для контроля за техническим состоянием подшипников по методу спектра огибающей необходим анализатор спектра вибрации с функцией анализа спектра огибающей высокочастотной вибрации. Метод базируется на анализе высокочастотной составляющей вибрации и выявлении модулирующих ее низкочастотных сигналов. Высокочастотная часть сигнала изменяет свою амплитуду во времени, т.е. она модулируется каким-то более низкочастотным сигналом.

Установлено, что наилучшие результаты метод даёт в том случае, если анализировать модуляцию не широкополосного сигнала, получаемого от акселерометра, а предварительно осуществить узкополосную фильтрацию сигнала. Для этого отфильтрованный сигнал детектируется, т.е. выделяется модулирующий сигнал (огибающая сигнала), который подаётся на узкополосный виброанализатор и мы получаем спектр интересующего нас модулирующего сигнала или спектр огибающей..

С помощью прибора СД-12, был произведен замер вибрации в точке №10 редуктора привода барабана (рис. 6), на конвейере №0104 УОИ-1 копрового цеха на ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК». Был выявлен износ дорожки тел качения внутреннего кольца подшипника №6308 (рис. 7).

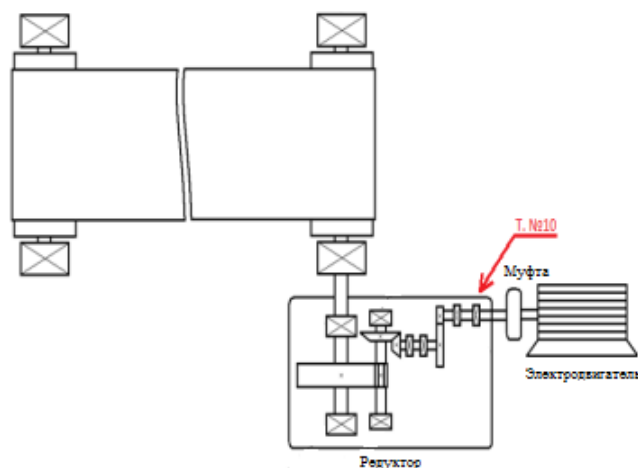


Рисунок 4 - Схема расположения точек контроля

По спектральному анализу (рис. 5) был выявлен износ дорожки тел качения внутреннего кольца подшипника №6308 (рис. 6).

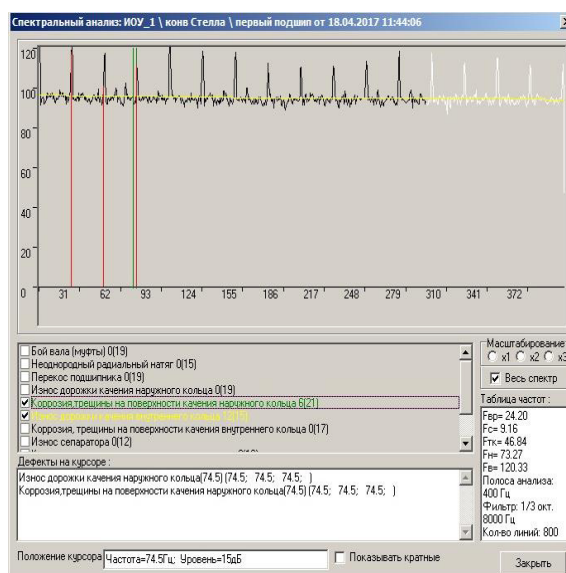


Рисунок 5 - Спектральный анализ



Рисунок 6 - Выявленный износ подшипника качения

Метод ударных импульсов. Метод ударных импульсов широко используется для диагностики электродвигателей насосного оборудования. Данный метод основан на измерении и регистрации механических ударных волн, вызванных столкновением двух тел. Ускорение частиц материала в точке удара вызывает волну сжатия, которая распределяется в виде ультразвуковых колебаний. Ускоре-

ние частиц материала в начальной фазе удара зависит только от скорости столкновения и не зависит от соотношения размеров тел. Период времени мал и заметной деформации не происходит. Величина фронта волны является мерой скорости столкновения (удара) двух тел. Во второй фазе удара поверхности двух тел деформируются, энергия движения отклонит тело и вызовет в нем колебания.

Для измерения ударных импульсов используется пьезоэлектрический датчик, на который не оказывает влияние фон вибрации и шум. Вызванная механическим ударом фронтальная волна сжатия возбуждает затухающие колебания в датчике (преобразователе).

Пиковое значение амплитуды этого затухающего колебания прямо пропорционально скорости удара. Поскольку затухающий переходный процесс очень хорошо определяется и имеет постоянную величину затухания, его можно отфильтровать от других сигналов, т.е. от сигналов вибрации. Частота соударения дефектов практически всегда лежит в диапазоне 28-32 кГц и эти колебания очень быстро затухают, поэтому на осциллограммах они выглядят практически как импульсы.

С помощью спектра (рис. 7), полученного методом ударных импульсов был обнаружен дефект внутренней обоймы подшипника FAG 6234 электродвигателя 5E1KG02 мощностью 1600 кВт дымососа №2 участка ПГУ-3 электросталеплавильного цеха №2 на ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК».



Рисунок 7 - Дефект внутренней обоймы подшипника FAG 6234

Вопрос «как долго прослужит подшипник» зависит от многих аспектов, но в первую очередь от частоты вращения машины. Если она равна 1500 об/мин и выше, развитие дефекта пройдет все стадии до разрушения достаточно быстро. Если же она равна 300 об/мин и ниже, это может занять и несколько месяцев, особенно если дефект наблюдается на внешней дорожке. Выкрашивание и расслоение металлической поверхности дорожек могут наблюдаться в течении длительного периода времени и быть вполне допустимыми, так как частота вращения вала низкая.

Подшипники очень быстро будут выходить из строя, если нагрузка на них будет превышать установленную техническими условиями. Фактором, определяющим срок службы, является частота вращения. На срок жизни подшипника существенно влияет вибрация. Проведенные исследования показали, что повышение вибрации машины от 5 до 10 мм/с сокращает срок службы подшипника почти на 70%.

Заключение. Постоянный и своевременный контроль за техническим состоянием оборудования с помощью современных методов и средств технической диагностики позволяет проводить планово-предупредительные ремонты с высокой степенью эффективности, обеспечивать надежную, безаварийную работу оборудования, а так же значительно сокращает его внеплановые простои. За 2016 год и первое полугодие 2017 года на предприятии был проведен тепловизионный контроль 147 объектов, при проведении вибродиагностики было выявлено и устранено около 6500 тыс. замечаний. Использование данных методов на практике позволило сохранить в работоспособном состоянии оборудование участка ПГУ-3 электросталеплавильного цеха №2, чем обеспечили плановые показатели выпуска продукции и предотвратили опасные выбросы продуктов горения в окружающую среду. Накопленный опыт по диагностике оборудования, типовых дефектах, сроках их возникновения, позволяет определить критический срок службы узлов, механизмов и их остаточный ресурс. Это дало возможность не только спланировать сроки проведения ремонтов, но и разработать цикл их проведения с учетом статистических данных. Применение данных методов позволяет ежегодно экономить предприятию немалые денежные средства на закупку и ремонт технологического оборудования.

Библиографический список

1. Гольдин А.С. Вибрация роторных машин. М.: Машиностроение, 1999. 344 с.
2. Радчик И.И., Рябков В.М., Сушко А.Е. Комплексный подход к вопросам повышения надежности работы основного и вспомогательного оборудования современного металлургического производства // Оборудование. Технический альманах. 2006. № 1. С. 24-28.
3. Сидоров В.А., Сушко А.Е. Выбор диагностических параметров стационарных систем контроля технического состояния металлургических машин // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2010. № 4. С. 46-50.

References

1. Gol'din A.S. *Vibracija rotornyh mashin. M.: Mashinostroenie, 1999. 344 s.*
2. Radchik I.I., Rjabkov V.M., Sushko A.E. *Kompleksnyj podhod k voprosam povyshenija nadezhnosti raboty osnovnogo i vspomogatel'nogo oborudovaniya sovremennogo metallurgicheskogo proizvodstva // Oborudovanie. Tehnicheskij al'manah. 2006. № 1. S. 24-28.*
3. Sidorov V.A., Sushko A.E. *Vybor diagnosticheskikh parametrov stacionarnyh sistem kontrolja tehničeskogo sostojanija metallurgicheskikh mashin // Tehnicheskaja diagnostika i nerazrushajushhij kontrol'. 2010. № 4. S. 46-50.*

УДК 621.838

DOI: 10.52691/2500-2651-2021-88-6-55-60

ДИСКОВО–КОЛОДОЧНЫЕ ТОРМОЗА АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Disc-Pad Brakes of Motor Vehicles

Сакович Н.Е., д-р техн. наук, профессор, Никитин А.М., канд. техн. наук, доцент,
Шилин А.С., аспирант, Рожнова В.С., Прудников С.А., магистранты
Sakovich N.Ye., Nikitin A.M., Shilin A.S., Rozhnova V.S., Prudnikov S.A.

ФГБОУ ВО «Брянский государственный аграрный университет»
Bryansk State Agrarian University

Аннотация. В статье рассмотрены тормозные свойства и конструкции колодочно–дисковых тормозов, которые отличаются малым отношением номинальной площади фрикционных накладок к номинальной площади поверхности трения тормозного диска – коэффициентом взаимного перекрытия элементов фрикционной пары, удельная энергоёмкость дисково–колодочных тормозов машин с повторно–кратковременным режимом работы, при равных условиях эксплуатации, выше удельной энергоёмкости других типов тормозных устройств в разы. Контакт фрикционных накладок с тормозным диском по плоскости с учетом малого значения коэффициента взаимного перекрытия обеспечивает более равномерное изнашивание фрикционного материала, облегчает регулирование и техническое обслуживание тормоза, момент инерции тормозного диска колодочно–дискового тормоза значительно меньше момента инерции колодочного или ленточного тормоза, что обеспечивает при пуске снижение нагрузки на приводной двигатель механизма и сокращение времени разгона машины, а при торможении – уменьшение загрузки тормоза. В большинстве конструкций дисково–колодочных тормозов используют устройства для автоматической компенсации износа фрикционных накладок, что положительно влияет на тормозные качества тормозов, рассмотрены условия улучшения тормозной эффективности колодочно–дисковых тормозов за счет различного типа крепления тормозных колодок, применения различных форм тормозных фрикционных накладок и способов их крепления. В дисково–колодочных тормозах коэффициент взаимного перекрытия менее единицы, причем его выбирают с учетом требования оптимальности формы элементов пары трения, что позволяет обеспечить максимальное использование тормоза по мощности при минимальных габаритных размерах фрикционной пары, в тормозах применяют секторные, круглые и прямоугольные накладки.

Abstract. *The article discusses the braking properties and designs of disc-pad brakes, differing in a small ratio of the nominal area of the friction pads to the nominal surface area of the friction disc - the coefficient of mutual overlap of the elements of the friction pair, the specific energy consumption of disc-pad brakes of machines with repeated short-term operation, under equal operating conditions, is higher than the specific energy consumption of other types of braking devices at times. The contact of the friction pads with the brake disc along the plane, taking into account the small value of the coefficient of mutual overlap, ensures more uni-*