

УДК 621.313.04-233.2:620.19

В.Б. Попов, М.Н. Погуляев, Л.В. Веппер, В.В. Логвин*УО «Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого»,
г. Гомель, Беларусь***ОБНАРУЖЕНИЕ ДЕФЕКТОВ ПОДШИПНИКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
МАШИН С ПОМОЩЬЮ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ**

Аннотация. *Статья посвящена вибродиагностике технического состояния подшипников качения электрических машин на ОАО «БМЗ». Представлены и проанализированы спектры сигналов вибраций, характерные для различных дефектов подшипников. Установлено, что только 9 % подшипников выходят из строя вследствие естественного износа. В остальных случаях выход из строя обусловлен неправильным применением или эксплуатацией подшипников.*

Ключевые слова: *вибродиагностика, вибрация, спектр сигнала, дефект, подшипник качения.*

V.B. Popov, M.N. Pogulyaev, L.V. Vepper, V.V. Logvin*Sukhoi State Technical University of Gomel, Belarus***DETECTION OF DEFECTS OF ELECTRIC BEARINGS MACHINES
USING MODERN CONTROL METHODS**

Abstract. *The article is devoted to vibration diagnostics of the technical condition of rolling bearings of electrical machines at OJSC "BSW". Spectra of vibration signals typical for various bearing defects are presented and analyzed. It has been found that only 9 % of bearings fail due to natural wear. Otherwise, the failure is due to improper use or operation of the bearings.*

Keywords: *vibration diagnostics, vibration, signal spectrum, defect, bearing.*

Введение. Эффективность и конкурентоспособность современного предприятия в значительной степени зависят от надежности эксплуатируемого данным предприятием оборудования. Поэтому встает главный вопрос о возможности контроля технического состояния, продления межремонтного периода и повышения надежности технологического оборудования. Согласно принятой стратегии ремонтов на ОАО «БМЗ» (ОАО «Белорусский металлургический завод – управляющая компания холдинга «Белорусская металлургическая компания») диагностика оборудования является важнейшим фактором снижения простоев, связанных с поломками оборудования.

Внедрение средств технической диагностики позволяет отказаться от обслуживания и ремонта по регламенту и перейти к прогрессивному принципу обслуживания и ремонта по фактическому состоянию, что дает значительный экономический эффект [1].

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

В состав агрегатов, задействованных в технологическом процессе, входит большое количество узлов роторного типа. Одним из основных этапов технической диагностики является определение дефектов механизма, которые представляют собой наибольшую опасность для его функционирования. Вибродиагностика является эффектив-

ным способом неразрушающего контроля технического состояния узлов роторного типа, позволяет выявить явно выраженные (дисбаланс, расцентровку, недостаточную жесткость опор), зарождающиеся дефекты подшипниковых узлов, дефекты электромагнитной системы электрической машины и другие.

Цель статьи – изучение дефектов подшипников, возникающих в электрических машинах, при помощи измерения вибрации на ОАО «БМЗ».

Основная часть. Спектр и форма сигнала вибрации содержат информацию о характерных дефектах подшипников качения. В этой информации содержатся специфические особенности в зависимости от вида дефекта. Одна из таких характерных особенностей – наличие несинхронных пиков, т.е. пиков, не являющихся кратными гармониками частоты вращения вала электрической машины. Спектр вибрации может содержать как дискретные пики, так и широкополосные частотные области высокого уровня. Во временном сигнале вибрации могут наблюдаться ударные импульсы, обусловленные перекатыванием элементов качения через дефекты дорожек или контактом дорожек с дефектными участками элементов качения.

Важным моментом является то, что колебания, связанные с дефектом подшипника качения, имеют меньшую амплитуду, чем колебания, связанные со многими другими повреждениями, такими, как дисбаланс, несоосность или дефекты зубчатой передачи.

Во временном сигнале вибрации и его спектре присутствуют характерные признаки дефектов подшипников качения, которые сильно зависят от вида дефекта. Один из таких признаков – присутствие в спектре несинхронных пиков, т.е. пиков, которые не являются целочисленными гармониками частоты вращения. Более того, при развитых дефектах можно наблюдать гармоники этих несинхронных пиков. Спектр может содержать как узкополосные пики, так и размытые «в виде холмов», в которых сосредоточена вибрационная энергия (рисунок 1).

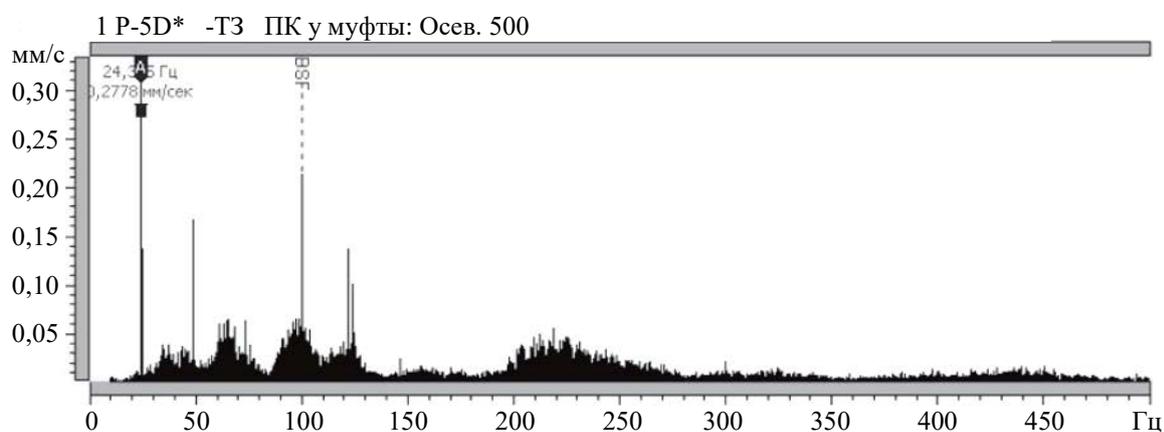


Рисунок 1. – Выкрашивание тел качения в подшипнике электрического двигателя

Из колебательных сил электромагнитного происхождения в электрических машинах следует выделить:

- магнитные силы, определяемые изменениями магнитной энергии в определенном ограниченном пространстве, как правило, в ограниченном по протяженности участка воздушного зазора;
- электродинамические силы, определяемые взаимодействием магнитного поля с электрическим током;
- магнитострикционные силы, определяемые эффектом магнитострикции, т.е. изменением линейных размеров магнитного материала под действием магнитного поля.

В электрических машинах переменного тока возможно возникновение специфических вибраций двух типов. Во-первых, это электромагнитные вибрации ферромагнитных сердечников и стальных конструктивных элементов электротехнического оборудования, по которым во время работы оборудования протекает переменный магнитный поток. Эти вибрации возникают за счет специфического процесса, который в литературе называется магнитострикцией. Этот эффект обусловлен тем, что при перемагничивании ферромагнитных материалов сердечника происходит изменение внутренней ориентации элементарных намагниченных частиц, доменов. При каждом перемагничивании сердечника происходит поворот доменов на 180 градусов, что в итоге и приводит к небольшому «линейному расширению» ферромагнитного материала. Поскольку перемагничивание сердечника магнитным потоком происходит дважды за один период питающей сети, то и частота вибрации, обусловленная эффектом магнитострикции, равна удвоенной частоте питающей сети, т.е. она равна 100 Гц. Вне зависимости от оборотной частоты вращения ротора электрической машины, частота вибрации сердечника (пакета стали статора) всегда равна 100 Гц.

Если оборотная частота ротора равна 50 Гц, то гармоника электромагнитной вибрации располагается на спектре в том месте, где может находиться вторая гармоника оборотной частоты. Если же оборотная частота ротора равна, например, 25 Гц, то гармоника электромагнитной вибрации на спектре будет располагаться на месте четвертой гармоники оборотной частоты.

Во-вторых, вибрации в электрической машине вызываются специфическими электродинамическими силами, которые в литературе принято называть «амперовыми силами», т.к. их величина определяется по закону Ампера. Самое важное для нас в этом законе заключается в том, что в числителе стоит произведение токов в проводниках, т.е. квадрат тока промышленной частоты. Из тригонометрии следует, что квадрат синусоидального сигнала есть другой гармонический сигнал, но имеющий удвоенную частоту. Получаем, что сила электродинамического воздействия между двумя проводниками с синусоидальными токами промышленной частоты имеет удвоенную частоту, относительно частоты питающей сети.

Таким образом, вибрации электрической машины, не вызванные механическими проблемами, имеют удвоенную частоту относительно частоты питающей сети, т.е. равную 100 Гц. Это определение относится как к электромагнитным причинам повышенной вибрации, возникающим в сердечниках электрических машин силами магнитострикции, так и к электродинамическим силам взаимодействия проводников друг с другом, возникающим при протекании токов по обмоткам электрической машины.

Подшипники качения имеют свои характерные частоты проявления дефектов, которые определяются их геометрическими размерами. Эти частоты можно рассчитать для внутренней и внешней дорожек сепаратора, шариковых или роликовых элементов.

Для расчета характерных частот необходимо знать число элементов качения, их диаметр, диаметр сепаратора и угол контакта. Если эти параметры известны, можно определить все характерные частоты, генерируемые каждым отдельным элементом подшипника.

В отличие от повреждений других видов характерные подшипниковые частоты будут появляться в спектре только в том случае, если есть дефекты конкретных элементов подшипников качения. Очень часто в спектре возможно появление сразу нескольких частотных составляющих, характерных для данного конкретного подшипника качения. Например, если на внешней дорожке присутствует какой-нибудь дефект, через некоторое время этот дефект вызовет износ элементов качения, а затем передастся и внутренней дорожке подшипника.

Дефекты подшипников, которые можно распознать с помощью вибрационного анализа, включают в себя дефекты внутренней и внешней дорожек качения, дефекты элементов качения, дефекты сепаратора, ослабление посадки подшипника, увеличенный внутренний зазор, проворачивание внутреннего кольца на валу, прекос подшипника и дефекты смазки.

Для оценки длительности службы подшипника становится актуальным вопрос о месте повреждения и степени его развития. Здесь важно знать – это внутренняя дорожка или внешняя, поскольку подшипник с дефектом на внешней дорожке может прослужить дольше, чем с дефектом на внутренней. Именно появление частотной составляющей, характерной для дефекта внутренней дорожки, требует особого внимания (рисунки 2, 3).

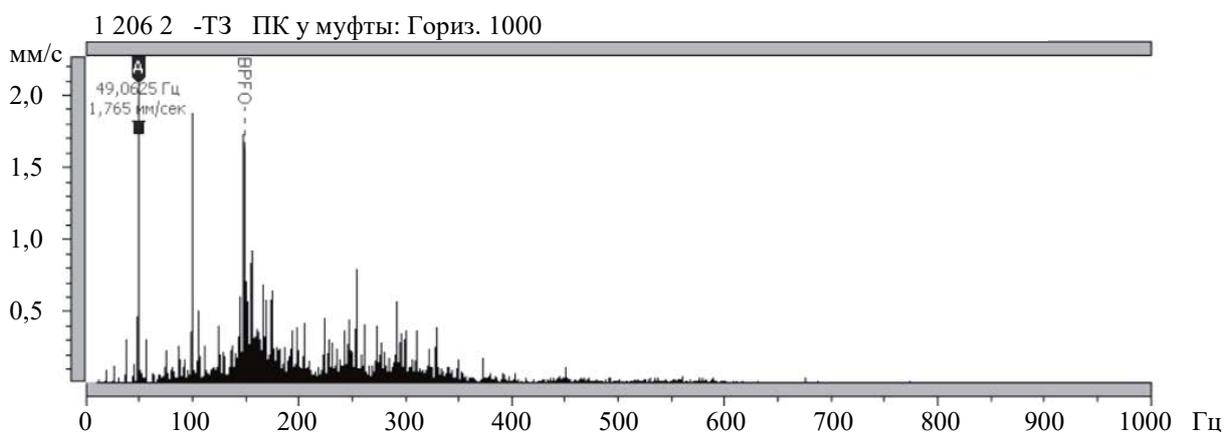


Рисунок 2. – Трещина на наружном кольце подшипника

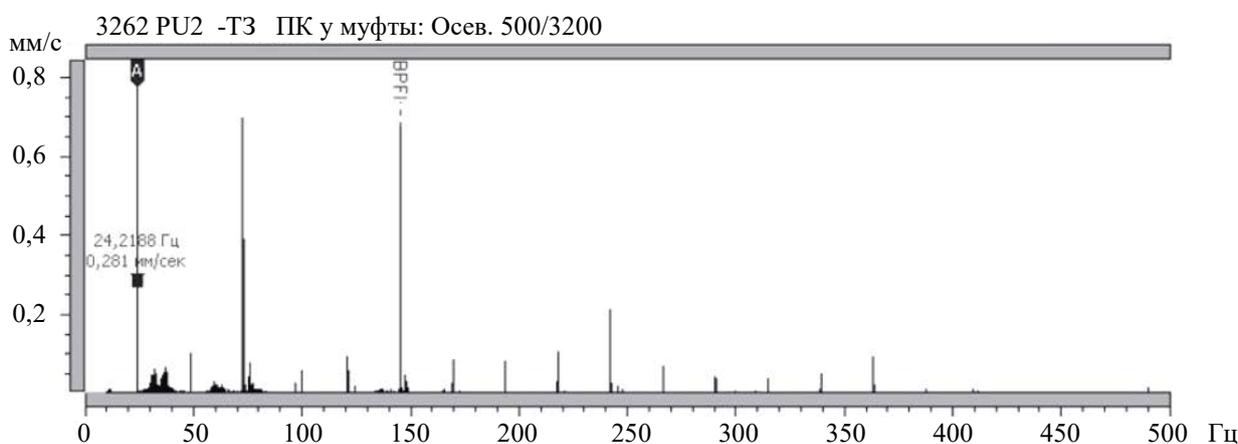


Рисунок 3. – Износ внутренней дорожки подшипника

В большинстве случаев способ использования подшипников таков, что внутренняя дорожка вращается, а внешняя остается неподвижной. Если дефект находится на внутренней дорожке, он постоянно перемещается вместе с ней и поэтому не всегда находится в зоне нагрузки, а временами – далеко уходит от места расположения датчика вибрации. Энергия вибрации передается от внутренней дорожки к датчику через элементы качения, сепаратор, внешнюю дорожку и корпус подшипника качения. Этот путь распространения вибрации гораздо хуже с точки зрения потерь энергии. Дефект также перемещается и часто находится вне зоны нагрузки, где удары значительно ослабевают. К тому же необходимо быть уверенным, что выборки сигналов, по которым

производится усреднение, длинные и охватывают, как минимум, один полный оборот вала электрической машины. В ином случае, может оказаться так, что в выборки не будут попадать самые мощные участки сигнала, когда дефект внутренней дорожки проходит зону нагрузки [2].

Если в спектре вибрации видны характерные частоты как для внутренней, так и для внешней дорожки, и обе они имеют одинаковую амплитуду (рисунок 4), то можно утверждать, что внутренняя дорожка имеет более развитый дефект. А если имеются дефекты на обеих дорожках, то можно предположить, что дефекты имеются также и на элементах качения. Они могут не всегда проявляться на соответствующих частотах, но могут вызвать появление боковых полос у частот, характерных для дефектов дорожек. Если все указывает на повреждение нескольких элементов подшипника качения, это должно рассматриваться как экстренный случай, поскольку дефекты элементов качения легко могут вызвать повреждения сепаратора, что приведет к полному разрушению подшипника, а вследствие – и к полному выходу из строя самой электрической машины.

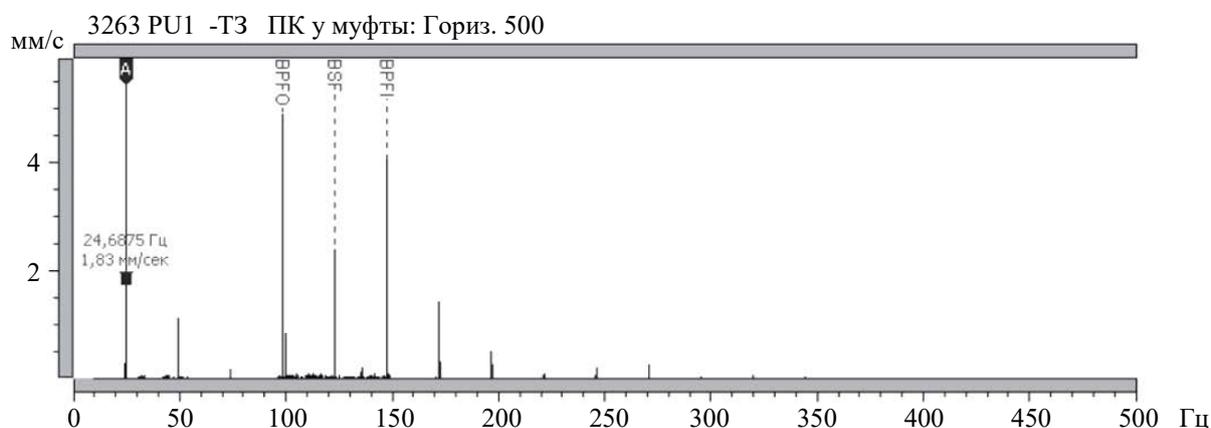


Рисунок 4. – Износ подшипника электрического двигателя

Часто возникает вопрос: что является причиной повреждений? Повышенная вибрация, изменение внутреннего зазора или отсутствие смазки? Если имеет место повышенная вибрация, определяемая действием каких-либо иных источников, можно попытаться уменьшить дисбаланс и перекосы в машине, прежде чем подшипник попадет в зону ускоренного разрушения. Особенно это касается перекосов. Если это отсутствие смазки, оно должно сопровождаться очень быстрыми изменениями в сигнале вибрации, повышенным нагревом подшипника и угрозой скорого выхода подшипника из строя.

Еще один вид дефектов связан с сепаратором (рисунок 5). Дефекты сепаратора проявляются на частоте вращения сепаратора (FTF) и сопровождаются, как правило, другими повреждениями в подшипнике. Эта составляющая единственная из всех подшипниковых составляющих, которая является субгармоникой, так как ее частота ниже частоты вращения вала электрической машины. Эту составляющую очень трудно обнаружить в спектре вибрации, поскольку в тот момент, когда она появляется, подшипник находится уже в очень плохом состоянии. Часто его работа при этом будет сопровождаться акустическим шумом, и до разрушения подшипника останется очень немного времени.

Появление в спектре первой гармоники оборотной частоты или боковых модуляционных полос, или даже значительного широкополосного шума свидетельствует о прогрессирующем дефекте, который приведет к изменению геометрии подшипника.

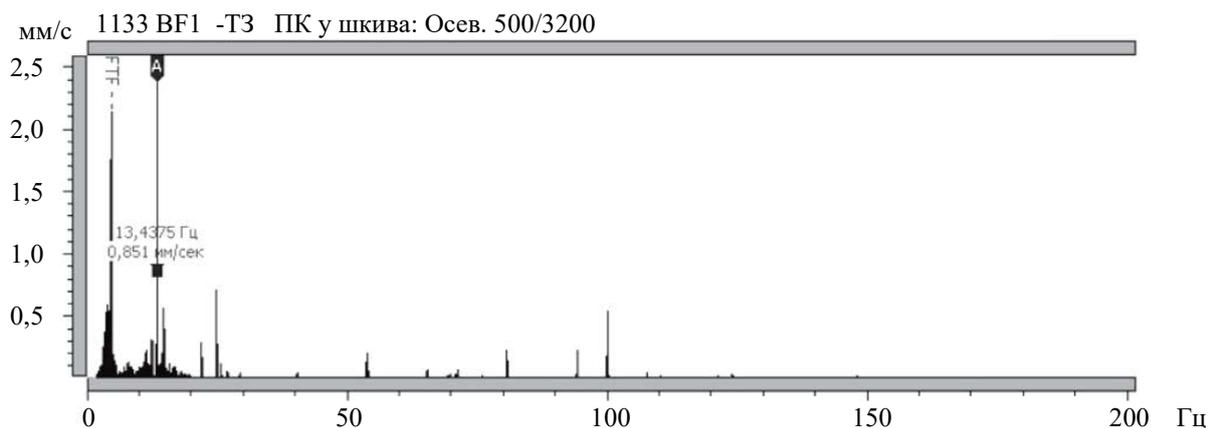


Рисунок 5. – Износ сепаратора подшипника SKF 6306

Многочисленные гармоники частоты вращения (например, от 1-й до 8-й) в спектре вибрации предполагают ослабление в соединениях и могут указывать на наличие увеличенных внутренних зазоров. Там, где ожидается увеличенный зазор, будет присутствовать большее число гармоник с большими амплитудами. Через некоторое время в спектре может появиться половинная гармоника и ее гармоники (т.е. составляющие на частотах 0,5; 1,5; 2,5; 3,5 и т.д. от оборотной) [3].

Если в спектре присутствует 3-я гармоника оборотной частоты, или же она заметно выделяется на фоне остальных гармоник, это может свидетельствовать о том, что подшипник проворачивается на валу (рисунок 6). Если же имеет место неплотная посадка корпуса подшипника, то в спектре вибрации следует ожидать появления нескольких гармоник частоты вращения вала, обычно доминирующими будут 1-я и 4-я гармоники.

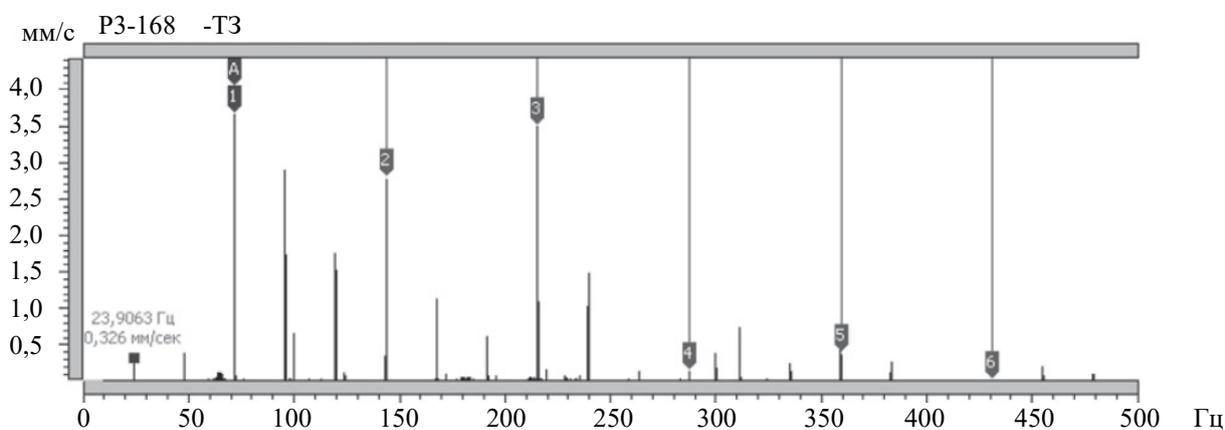


Рисунок 6. – Проворачивание подшипника качения 305 на валу электрического двигателя

Если же в подшипнике имеет место перекося, его также можно распознать с помощью анализа вибрации. В этом случае следует обратить внимание на частоту, равную частоте вращения вала, умноженную на число тел качения в подшипнике.

Заключение. Анализ статистики вибродиагностических работ на предприятии показал, что примерно 42 % подшипников электрических машин выходят из строя вследствие избытка или недостатка смазки; 26 % связаны с неправильной установкой подшипника, например, когда подшипник пытаются поставить на место с помощью ударного инструмента или наклейки и сварки; 23 % включают неправильное применение подшипников, дефекты сборки и повышенную вибрацию; только 9 % подшипников

выходят из строя вследствие естественного износа. Своевременное выявление дефектов подшипников позволило избежать значительных затрат, связанных с ремонтом и эксплуатацией электрических машин. Таким образом, вибродиагностика является важнейшей частью профилактического техобслуживания, позволяющей продлить срок службы оборудования, сократить расходы на его ремонт и эксплуатацию.

Список использованных источников

1. Баркова, Н.А. Введение в виброакустическую диагностику роторных машин и оборудования / Н.А. Баркова. – СПб.: Изд. центр СПбМТУ, 2006. – 160 с.
2. Гольдин, А.С. Вибрация роторных машин / А.С. Гольдин. – М.: Машиностроение, 1999. – 344 с.
3. Биргер, И.А. Техническая диагностика / И.А. Биргер. – М.: Машиностроение, 1978. – 240 с.

Информация об авторах

Виктор Борисович Попов – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Сельскохозяйственные машины», УО «Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого» (пр. Октября, 48, 246029, г. Гомель, Беларусь), e-mail: popow@gstu.by.

Михаил Никифорович Погуляев – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Автоматизированный электропривод», УО «Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого» (пр. Октября, 48, 246029, г. Гомель, Беларусь), e-mail: poguljaev@gstu.by.

Леонид Владимирович Веппер – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Автоматизированный электропривод», УО «Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого» (пр. Октября, 48, 246029, Гомель, Беларусь), e-mail: vepper@gstu.by.

Владимир Васильевич Логвин – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Автоматизированный электропривод», УО «Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого» (пр. Октября, 48, 246029, г. Гомель, Беларусь), e-mail: logvin@gstu.by.

Information about the authors

Viktor Borisovich Popov – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Agricultural Machines, Sukhoi State Technical University of Gomel (48, Oktyabrya Ave., 246029, Gomel, Belarus), e-mail: popow@gstu.by.

Mikhail Nikiforovich Pogulyaev – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of the Automated Electric Drive Department, Sukhoi State Technical University of Gomel (48, Oktyabrya Ave., 246029, Gomel, Belarus), e-mail: poguljaev@gstu.by.

Leonid Vladimirovich Vepper – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of the Automated Electric Drive Department, Sukhoi State Technical University of Gomel (48, Oktyabrya Ave., 246029, Gomel, Belarus), e-mail: vepper@gstu.by.

Vladimir Vasilievich Logvin – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of the Automated Electric Drive Department, Sukhoi State Technical University of Gomel (48, Oktyabrya Ave., 246029, Gomel, Belarus), e-mail: logvin@gstu.by.

Поступила в редакцию 22.10.2021 г.