

Bibliography (transliterated): 1. *Almazno-abrazivnaja obrabotka materialov: spravochnik*. Ed. A. N. Reznikov. Moscow: Mashinostroenie, 1977. Print. 2. Jakimov, A. V. *Optimizacija processa shlifovanija*. Moscow: Mashinostroenie, 1975. Print. 3. Evseev, D. G., and A. I. Sal'nikov. *Fizicheskie osnovy processa shlifovanija*. Saratov: Izd-vo Sarat. un-ta, 1978. Print. 4. Korol'ov A.V., and Y. K. Novosjolov. *Teoretiko-verojatnostnye osnovy abrazivnoj obrabotki*. Saratov: Izd-vo Sarat. un-ta, 1989. Print. 5. Husu, A. P., Y. R. Vitenberg and V. A. Pal'mov. *Sherohovatosi' poverhnostej (teoretiko-verojatnostnyj podhod)*. Moscow: Nauka, 1975. Print. 6. Novikov, F. V., and V. G. Shkurupij. "Issledovanija sherohovatosi poverhnosti pri almazno-abrazivnoj obrabotke metodami teorii verojatnosti." *Visnyk NTU «KhPI»*. No. 44. Kharkiv: NTU «KhPI», 2004. 140–149. Print. 7. Ventcel', E. S. *Teorija verojatnostej*. Moscow: Nauka, 1969. Print.

Поступила (received) 16.09.2015

Новіков Федір Васильович – доктор технічних наук, професор, Харківський національний економічний університет імені С. Кузнеця, м. Харків; тел.: (067) 68-90-342; e-mail: fokusnic1@rambler.ru.

Новиков Федор Васильевич – доктор технических наук, профессор, Харьковский национальный экономический университет имени С. Кузнеця, г. Харьков; тел.: (067) 68-90-342; e-mail: fokusnic1@rambler.ru.

Novikov Fedor Vasilevich – Doctor of Technical Sciences, Professor, S. Kuznets Kharkiv National University of Economics, Kharkov; tel.: (067) 68-90-342; e-mail: fokusnic1@rambler.ru.

Мінчев Роман Михайлович – інженер, ТОВ «Енергореле», м. Маріуполь; тел.: (050) 999-79-65; e-mail: fokusnic1@rambler.ru.

Минчев Роман Михайлович – инженер, ООО «Энергореле», г. Мариуполь; тел.: (067) 68-90-342; e-mail: fokusnic1@rambler.ru.

Minchev Roman Mikhaylovich – Engineer, Energorele Ltd., Mariupol; tel.: (067) 68-90-342; e-mail: fokusnic1@rambler.ru.

УДК 629.4.027.11: 681.518.5

В. М. ПЕТУХОВ

МОДЕЛЬ ПРЕДОТКАЗНОГО СОСТОЯНИЯ БУКСОВЫХ УЗЛОВ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Определено, что наибольший риск возникновения ошибки в определении технического состояния буксового узла возникает в так называемой «зоне неопределенности» из-за невозможности однозначно оценить его техническое состояние. Для решения этой задачи предложена модель в виде n – мерного радиус-вектора, имеющего направление к увеличению вероятности отказа и ухудшению значений параметров. Разработанная модель определения предотказного состояния будет способствовать уменьшению вероятности принятия ошибочных решений.

Ключевые слова: буксовый узел, контроль технического состояния, встроенное средство контроля, зона неопределенности, предотказное состояние, радиус-вектор.

Введение. Одно из главных требований, предъявляемых к железнодорожному транспорту, является обеспечение безопасности перевозок грузов и пассажиров. Одним из элементов, непосредственно влияющим на безопасность движения подвижного состава, является буксовый узел. Отказ этого узла во время движения однозначно приводит к тяжелым последствиям – сходу вагона с рельсов.

Существующая инфраструктура системы теплового контроля букс (СТК) до недавнего времени, когда буксовые узлы вагонов были унифицированы, успешно выявляла неисправные буксы путем дистанционного измерения температуры её корпуса.

Появление на железных дорогах страны подвижного состава новой конструкции [1] с разнообразными конструкциями ходовых частей, с различными типами подшипников, привело к трудностям в определении технического состояния букс.

Контроль существующими дистанционными (бесконтактными) средствами нередко приводит к ошибочным тревогам, который составляет около 13% от всех случаев остановок поезда по нагреву букс. При этом наблюдается тенденция роста количества таких ошибок из-за увеличения числа вагонов с разнообразными типами букс, подшипников и смазки. Это приводит к необоснованным задержкам в движении, срывам стабильности и ритмичности перевозок. А также ведет к нерациональным затратам трудовых, материальных и финансовых ресурсов.

Стремление повысить контролепригодность букс, вынудили компании, выпускающие железнодорожные подшипники, использовать для своих изделий встроенные средства контроля их технического состояния. Производители буксовых узлов, такие как SKF (Швеция), FAG (Германия), Timken (США), оснащают свои буксы такими системами. Также значительные работы проводятся по возможности передачи и обработки данных с помощью беспроводных сетей [2 – 5]. Подобные работы ведутся и в нашей стране [6].

Такие системы имеют возможность, в отличие от дистанционных, измерять непосредственно диагностические параметры буксового узла за счет размещения соответствующих датчиков на контролируемых элементах, накапливать результаты измерений в устройстве памяти, а также производить первичную обработку информации.

© В. М. Петухов, 2015

Анализ последних исследований. Обзор работ по теории и практике методов контроля и диагностирования технического состояния подвижного состава в эксплуатации показали, что в настоящее время проблемам диагностики ходовых частей вагонов уделяется повышенное внимание для увеличения достоверности оценки технического состояния объектов [2 – 4].

Большое практическое значение в определении температурных параметров буксовых узлов отмечено в работах [7 – 9]. Разнообразие конструкций букс породило ряд принципиальных проблем с их контролем, работа [10] посвящена контролепригодности буксовых узлов к тепловому контролю.

Методам раннего выявления неисправных букс посвящена работа [11].

Определено, что в данное время наиболее актуальной задачей является раннее обнаружение дефекта подшипника и определение остаточного ресурса буксы, у которой был выявлен дефект во время движения поезда. Однако недостаточное внимание исследователей посвящено определению и формулировке такого понятия, как "предотказное состояние", и построению математической модели объекта в этом состоянии.

Постановка задачи. Анализ результатов испытаний и опыта эксплуатации различных встроенных систем контроля букс показывает, что данные системы обладают еще нереализованным потенциалом, таким как возможность раннего обнаружения и отслеживания развития дефекта подшипника, прогнозирование его остаточного ресурса при выявлении дефекта. Поэтому задачей данного исследования является построение модели предотказного состояния буксового узла для начала процедуры определения остаточного ресурса.

Модель предотказного состояния. Согласно действующей инструкции в зависимости от степени нагрева буксы средства теплового контроля подвижного состава (АСДК-Б, КТСМ) подают оператору три вида тревоги. Сигнал предаварийного уровня «Тревога-0» не требует остановки состава, по сигналу аварийного уровня «Тревога-1» поезд требуется остановить для осмотра на ближайшей станции, при критическом уровне «Тревога-2» обязательны немедленная остановка и осмотр букс указанного вагона.

Однако решение диагностической задачи (отнесение к исправным или неисправным состояниям) всегда связано с риском фиктивной тревоги или пропуска дефекта.

Решение этой проблемы для буксовых узлов современных вагонов является важнейшей задачей безопасности на железнодорожном транспорте. Фиксация начала развития опасного дефекта дает возможность во многих случаях предотвращать отказы. Своевременное и достоверное выявление неисправностей и информирование обслуживающего персонала позволяет принять необходимые меры и предотвратить тяжелые последствия их развития от поломки и выхода из строя этого ответственного узла, а также свести к минимуму число задержек в движении. При этом можно значительно уменьшить износ конструктивных элементов. Кроме того, решение этой проблемы, оказывает содействие сокращению затрат на техническое обслуживание и ремонт, поскольку ремонт, который проводится на перегоне, приводит к значительно большим затратам, чем тот, который выполняется на специализированных путях вагонного депо.

При определении технического состояния буксового узла требуется высокая надежность распознавания (большая стоимость ошибок пропуска аварийных букс или ложной тревоги).

Игнорирование аварийных сигналов приводит к тяжелым последствиям – горячим изломам шеек оси со сходом вагона с рельсов. Ложные сигналы тревоги вызывают задержки в движении поездов, а также материальные, финансовые и имиджевые потери железнодорожного транспорта.

Основным диагностическим признаком технического состояния буксового узла является его температура.

Важнейшим элементом комплекса математического обеспечения диагностической модели является *тепловая модель буксового узла*, описываемая уравнением:

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{P \cdot N \cdot \pi \cdot D \cdot f}{\sum_{i=1}^n c_i \cdot p_i} - \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot F_i \cdot (T - T_3)}{\sum_{i=1}^n c_i \cdot p_i}, \quad (1)$$

где P – нагрузка на буксу, Н; N – частота вращения, с^{-1} ; D – диаметр подшипника, м; f – приведенный коэффициент трения, который учитывает суммарное трение качения и скольжение рабочих поверхностей подшипников, сопротивление смазки и трение роликов с сепаратором; c_i – удельная теплоемкость элементов буксы и колесной пары, Дж/кг·К; p_i – масса элементов буксы и колесной пары, кг; τ – время работы подшипника, с; α_i – коэффициент теплопередачи, Вт/м²·К; F_i – площадь поверхности буксы, м²; T, T_3 – соответственно температуры поверхности корпуса буксы и окружающего воздуха, К.

Изучение процессов теплообразования и теплопередачи, которые происходят в работающем буксовом узле, имеет большое значение при решении практических задач диагностики букс на ходу поезда.

Для решения задачи оценки технического состояния требуется определить в первую очередь диагностические признаки (признаки распознавания), которые характеризуют техническое состояние узла.

При этом вводятся следующие ограничения на выбор используемых признаков (контролируемых параметров):

- Использовать те признаки, относительно которых может быть получена априорная информация, достаточная для определения технического состояния буксового узла;

- Исключить те признаки, которые малоинформативные и не имеют достаточных разделительных свойств;
- Учитывать технические возможности средств контроля.

Температура буксового узла является главным параметром, который характеризует техническое состояние подшипников. Как правило, повышенный нагрев узла свидетельствует о неисправности подшипников. Однако, зачастую причиной повышенной температуры буксы не обязательно может быть какой-либо дефект. Например, избыток смазки, который бывает после ревизии буксы во время приработки подшипника, вызывает сверхнормативное повышение температуры. При этом излишняя смазка постепенно выдавливается через лабиринтные уплотнения корпуса и, после определенного пробега вагона, температурный режим узла приходит в норму (рис. 1). Также интенсивный нагрев букс может наблюдаться при недостаточном радиальном и осевом зазорах в подшипнике, что также не является опасным дефектом.

Немаловажное значение на повышенную температуру буксового узла оказывают условия эксплуатации – неравномерность загрузки вагона, а также количество и протяженность кривых участков пути, когда на буксу действуют увеличенные осевые нагрузки.

Таким образом, в подобных случаях система распознавания не способна однозначно оценить состояние объекта. Для таких событий в технической диагностике предусмотрено понятие *зона неопределенности* (зона отказа от распознавания). Наглядно зона неопределенности представлена на рис. 2.

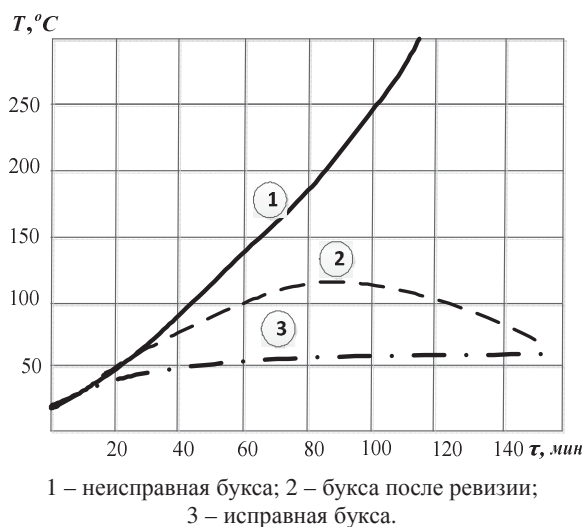


Рис. 1 – График температуры буксы в зависимости от ее технического состояния.

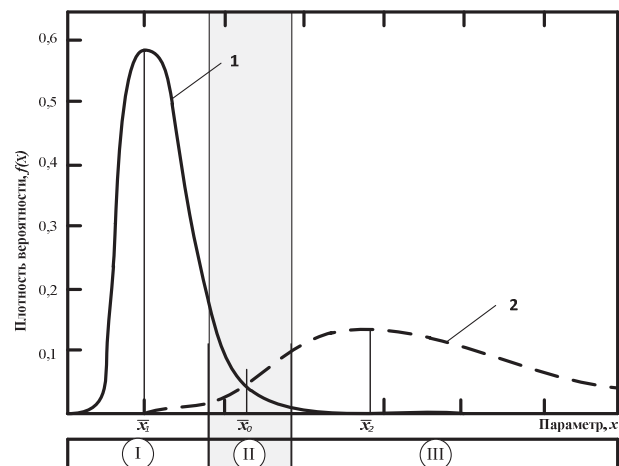


Рис.2 – Графическая иллюстрация зоны неопределенности при оценке технического состояния.

Данное состояние возникает при следующих условиях [12]:

$$\text{при } x \leq x_a \quad x \in D_1; \text{ при } x \geq x_b \quad x \in D_2; \text{ при } x_a \leq x \leq x_b \quad x \in D_3, \quad (2)$$

где x_a, x_b – граничные значения технического исправного и неисправного состояния соответственно; D_1 – диагноз исправного состояния буксы; D_2 – диагноз неисправного состояния буксы; D_3 – неопределенное состояние буксы.

Поскольку постепенные отказы происходят в результате непрерывного ухудшения рабочих параметров буксового узла, их можно прогнозировать. Поэтому среди работоспособных состояний можно выделить *критическое работоспособное состояние*, наступление которого влечет за собой скорый переход в неработоспособное состояние.

Выделение критического работоспособного состояния буксы дает возможность произвести замену колесной пары до наступления отказа. А также впоследствии восстановить, а не утилизировать поврежденный узел.

Однако, следует сразу определить, для каких типов букс по характеру нагрева целесообразно использовать данную процедуру. Используя такой признак распознавания, как прирост температуры ΔT_i возможно сразу классифицировать неисправные буксовые узлы двух принципиально разных типов (рис. 3):

– *линейного* – для этих букс характерен равномерный, линейный рост температуры до достижения предельного значения;

– *экспонентного* – происходит стремительный рост температуры, это требует аварийной остановки поезда. Соответственно, рассматривать буксы "экспонентного" типа в нашем случае не имеет смысла.

Таким образом, требуется определить при каком техническом состоянии буксы, дальнейшая ее эксплуатация ведет к отказу, то есть когда отказ еще не состоялся, но вероятность его возникновения высокая.

Для фиксации такого технического состояния предлагается ввести понятие *предотказное состояние буксового узла*.

Переход технического объекта в такое состояние принято называть *предотказом*, а само состояние – предотказным состоянием.

Под предотказном состоянии будем понимать такое работоспособное состояние объекта, когда хотя бы один из параметров, характеризующих его способность выполнять заданные функции, приближается к граничному значению, определенному нормативно-технической документацией, при котором не может быть гарантирована работоспособность объекта при дальнейшем изменении данного параметра.

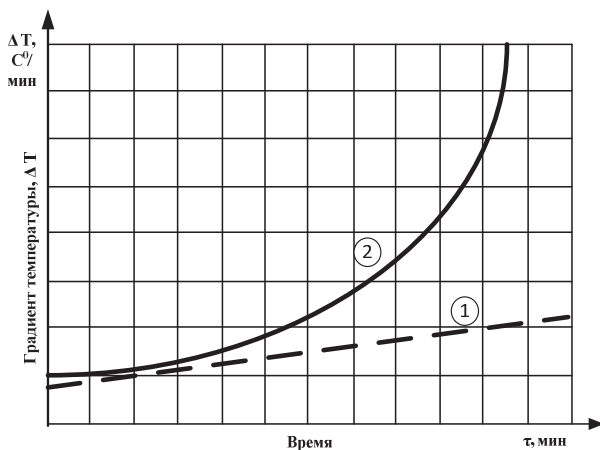
Чтобы определить предотказное состояние, необходимо учесть характер изменения диагностических параметров, например, таких как температура и темп ее роста. Здесь вероятность дальнейшего ухудшения параметров должна быть больше, чем вероятность их улучшения, то есть должна сохраняться тенденция ухудшения параметров. Отсутствие динамики изменения контролируемых параметров не является признаком такого состояния. Для фиксации предотказного состояния должно выполняться следующее условие:

$$P(H) > P(I), \quad (2)$$

где $P(H)$ – вероятность неисправного состояния; $P(I)$ – вероятность нормального (исправного) состояния буксы.

То есть вероятность того, что буксовый узел неисправен, должна быть выше вероятности его исправности.

Для определения предотказного состояния буксового узла предлагается модель в виде n -мерного радиус-вектора технического состояния объекта, который имеет направление к увеличению вероятности отказа, и ухудшению значений контролируемых параметров. (рис. 4). Для более точного определения предотказного состояния, как векторной величины, желательно использовать *динамические признаки распознавания*, то есть те, что отображают изменения параметров во времени. В частном случае модель предотказного состояния имеет вид трехмерного радиус-вектора, где абсциссе отвечает значение времени τ , ординате – диагностический параметр – температура T , аппликате – вероятность того, что букса находится в неисправном состоянии $P(H)$. За начало координат принимается значение параметра, при котором $P(I) = P(H)$, на рис. 3 это точка x_0 .



1 – буксы линейного типа; 2 – буксы экспонентного типа.

Рис. 3 – Типы аварийно греющихся букс.

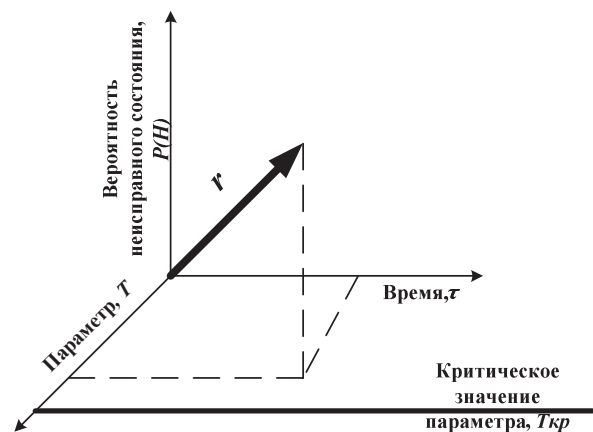


Рис. 4 – Радиус-вектор технического состояния буксового узла.

Перспективы дальнейших исследований. Перспективным путем продолжения данного исследования должно стать построение прогностической модели для буксовых узлов, находящихся в предотказном состоянии. Это позволит принимать решения о режиме движения поезда, в составе которого находится вагон с неисправной буксой.

Выводы. На основе проведенных исследований в работе были получены следующие результаты. Показано, что не все буксовые узлы, имеющие повышенную температуру, являются неисправными. Наибольший риск возникновения ошибки в определении технического состояния буксового узла возникает в так называемой *зоне неопределенности* из-за невозможности однозначно оценить его техническое состояние. Для определения технического состояния буксы в зоне неопределенности предложена модель в виде n -мерного радиус-вектора, имеющего направление к увеличению вероятности отказа и ухудшению значений параметров.

Таким образом, разработанная модель определения предотказного состояния будет способствовать уменьшению вероятности ошибочного принятия решений о режиме движения поезда. Что, несомненно, повлияет на повышение безопасности движения поездов и на стабильность перевозочного процесса.

Список литературы: 1. Фомін О.В. Підвищення ступеня ідеальності вантажних вагонів та прогнозування стадій їх еволюції // Науковий вісник Національного гірничого університету. – Дніпропетровськ: НГУ, 2015. – №3. – С. 68 – 76. 2. Hodge V., O’Keefe S., Weeks M., Moulds A. Wireless Sensor Networks for Condition Monitoring in the Railway Industry: A Survey / IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2015. – Vol. 16. – №3 (06). – P. 1088 – 1106. 3. Nan W., et al. Research on linear wireless sensor networks used for online monitoring of rolling bearing in

freight train // J. Phys., Conf. Ser. – Jan. 2011. – № 1. – P. 012 – 024. **4.** Schobel A., Karner J. Betrieb und Verkehr - Optimierungspotenziale bei der Stationierung von Heisslauferortungsanlagen // Eisenbahntechnische Rundschau ETR. – 2005. – №12. – P. 805 – 808. **5.** Reason J., Chen H., Crepaldi R., Duri S. Intelligent Telemetry for Freight Trains // Mobile Computing, Applications, Services. – 2010. – Vol. 35. – P. 72 – 91. **6.** Мартынов И.Э., Петухов В.М. Натурные испытания встроеной системы контроля технического состояния буксовых узлов // Мир транспорта. – 2013. – № 2. – С. 180 – 182. **7.** Мартынов И.Э. Результаты температурных испытаний дошедших буксовых узлов вантажных вагонів // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2004. – № 7 (1). – С. 66 – 69. **8.** Siyuan Ai, Wenzhong Wang, Yunlong Wang, Ziqiang Zhao Temperature rise of double-row tapered roller bearings analyzed with the thermal network method // Tribology International. – July 2015. – Vol. 87. – P. 11 – 22. **9.** Ke Yan, et al. Theoretical and experimental investigation on the thermal characteristics of double-row tapered roller bearings of high speed locomotive // International Journal of Heat and Mass Transfer. – May 2015. – Vol. 84. – P. 1119 – 1130. **10.** Миронов А.А., Образцов В.Л., Павлюков А.Э. Контролепригодность подвижного состава к тепловой бесконтактной диагностике // Автоматика, связь, информатика. – 2006. – № 11. – С. 54 – 57. **11.** Панкратов Л.В., Чистяков С.Н. Мониторинг нагрева букс // Автоматика, связь, информатика. – 2008. – №6. – С. 23 – 24. **12.** Биргер И.А. Техническая диагностика. – М.: Машиностроение, 1978. – 240 с.

Bibliography (transliterated): 1. Fomin, O.V. "Pidvyshhennja stupenja ideal'nosti vantazhnyh vagoniv ta prognozuvannya stadij i'h evoljucii." *Naukovyj visnyk Nacional'nogo girnychogo universytetu*. Dnepropetrovsk: NGU. No. 3. 2015. 68–76. Print. **2.** Hodge, V., et al. "Wireless Sensor Networks for Condition Monitoring in the Railway Industry: A Survey." *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. Vol. 16. No. 3 (06). 2015. 1088–1106. Print. **3.** Nan, W., et al. "Research on linear wireless sensor networks used for online monitoring of rolling bearing in freight train." *J. Phys., Conf. Ser.* No. 1. 2011. 012–024. Print. **4.** Schobel, A., and J. Karner. "Betrieb und Verkehr - Optimierungspotenziale bei der Stationierung von Heisslauferortungsanlagen." *Eisenbahntechnische Rundschau ETR*. No. 12. 2005. 805 – 808. Print. **5.** Reason, J., et al. "Intelligent Telemetry for Freight Trains." *Mobile Computing, Applications, Services*. Vol. 35. 2010. 72–91. Print. **6.** Martynov, I. Je., and V. M. Petuhov. "Naturnye ispytaniya vstroennoj sistemy kontrolja tehničeskogo sostojanija buksovych uzlov." *Mir transporta*. No. 2. 2013. 180–182. Print. **7.** Martynov, I. E. "Rezultaty temperaturnyh vyprobuvan' doslidnyh buksovych vuzliv vantazhnyh vagoniv." *Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij*. No. 7 (1). 2004. 66–69. Print. **8.** Siyuan, Ai. et al. "Temperature rise of double-row tapered roller bearings analyzed with the thermal network method." *Tribology International*. Vol. 87. 2015. 11–22. Print. **9.** Ke, Yan et al. "Theoretical and experimental investigation on the thermal characteristics of double-row tapered roller bearings of high speed locomotive." *International Journal of Heat and Mass Transfer*. Vol. 84. 2015. 1119–1130. Print. **10.** Mironov, A. A., V. L. Obrazcov and A. Je. Pavljukov. "Kontrol'prihodnost' podvizhnogo sostava k teplovoj beskontaktojnij diagnostike." *Avtomatika, svjaz', informatika*. No. 11. 2006. 54–57. Print. **11.** Pankratov, L. V., and S. N. Chistjakov. "Monitoring nagreva buks." *Avtomatika, svjaz', informatika*. No. 6. 2008. 23–24. Print. **12.** Birger, I. A. *Tehničeskaja diagnostika*. Moscow: Mashinostroenie, 1978. Print.

Поступила (received) 30.10.2015

Петухов Вадим Михайлович – кандидат технічних наук, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків; тел.: (057) 730-10-35; e-mail: hiitwagon@mail.ru.

Петухов Вадим Михайлович – кандидат технічних наук, Український державний університет залізничного транспорту, г. Харьков; тел.: (057) 730-10-35; e-mail: hiitwagon@mail.ru.

Petukhov Vadim Mykhaylovych – Candidate of Engineering Sciences, Ukrainian State University of Railway Transport, tel.: (057) 730-10-35; e-mail: hiitwagon@mail.ru.

УДК 629.7.05

Ю. А. ПЛАКСІЙ

УЗАГАЛЬНЕННЯ ТРЬОХЧАСТОТНОЇ ТРИГОНОМЕТРИЧНОЇ КВАТЕРНІОННОЇ МОДЕЛІ ОБЕРТАННЯ ТВЕРДОГО ТІЛА. ПЕРШИЙ ТИП МОДЕЛІ

Запропонована нова неперервна модель обертання твердого тіла, основана на трьохчастотному представленні кватерніона орієнтації в функціях кутів, що одночасно змінюються у часі згідно лінійного закону. Побудовані аналітичні залежності для квазікоординат на такті обчислень параметрів орієнтації і компонентів кватерніона, що відповідають такому обертальному руху. Для декількох наборів параметрів отримані чисельні реалізації моделі. Результати представлені у формі залежностей квазікоординат від часу і траєкторій у конфігураційному просторі для параметрів орієнтації. Показано, що нова модель описує обертання твердого тіла, що різниться від випадку регулярної прецесії. Модель може бути застосована в якості еталонної для отримання оцінок похибок алгоритмів визначення орієнтації в безплатформених системах.

Ключові слова: кватерніон, орієнтація, еталонна модель, квазікоординати, траєкторії у конфігураційному просторі.

Вступ і постановка задачі. Аналіз похибок розрахункових алгоритмів, що застосовуються в *безплатформених інерціальних навігаційних системах* (БНС), є важливим етапом проектування програмного забезпечення таких систем [1]. Для цього використовуються *еталонні моделі* обертання твердого тіла, які встановлюють певний зв'язок між кватерніоном орієнтації і первинною інформацією про обертання твердого тіла на такті обчислень $[t_{n-1}, t_n]$, що надходить з виходів вимірювачів кутової швидкості у вигляді *квазікоординат* [2]:

$$\theta_{ni}^* = \int_{t_{n-1}}^{t_n} \omega_i dt, \quad i = 1, 2, 3, \quad (1)$$

де ω_i , $i = 1, 2, 3$ – проєкції вектора абсолютної кутової швидкості об'єкта $\vec{\omega}$ на осі зв'язаної системи координат.

У випадку застосування аналітичних (*неперервних*) еталонних моделей забезпечується точний зв'язок між квазікоординатами (1) і кватерніоном орієнтації моделі, бо в цьому випадку результати моделювання не містять