$$\gamma_{\text{ПГТср}} = (\gamma_{\beta 0} + \gamma_{\beta 1})z + \sum_{i=0}^{3} \gamma_{\delta xi} ,$$

$$\sigma_{a\text{ср}} = (\sigma_{\beta 0} + \sigma_{\beta 1})z + \sum_{i=0}^{3} \sigma_{\delta xi} ,$$

$$\sigma_{\gamma\text{ср}} = (\sigma_{\gamma\beta 0} + \sigma_{\gamma\beta 1})z + \sum_{i=0}^{3} \sigma_{\gamma\delta xi} .$$

Таким образом, для повышения точности оценки ресурса времени $T_р$, в течение которого металлорежущий станок будет работать безотказно с определённой долей вероятности, необходимо пользоваться полной формулой (1) для определения вероятности безотказной работы станка (при этом аргумент функции Лапласа является квантилем $X_р$ нормального распределения).

При таком подходе к определению $T_р$, ресурс времени безотказной работы станка определяется с учётом величин всех параметров геометрической точности станка, а также их изменений во времени.

ЛИТЕРАТУРА

1 Проников, А.С. Надёжность машин [Текст] / А.С. Проников. – М.: Машиностроение, 1978. – 592 с.

2 Шор, Я.Б. Таблицы для анализа и контроля надёжности [Текст] / Я.Б. Шор, Ф.И. Кузьмин. – М.: Издательство «Советское радио», 1968. – 288 с.

3 Аникеева, О.В. Управление этапом планирования для повышения качества процесса ремонта металлорежущих станков [Текст]: Автореферат дисс… канд. техн. наук по специальности 05.02.23 «Стандартизация и управление качеством продукции» / О.В. Аникеева. – Курск, 2012. – 16 с.

Аникеева Олеся Владимировна
ФГБОУ ВПО «Юго-Западный государственный университет», город Курск, Россия
инженер кафедры «Управление качеством, метрология и сертификация»,
кандидат технических наук
телефон: 8(4712)32-60-90; E-mail: olesya-anikeeva@yandex.ru
УДК 681.2.082.615.849

Л.А. ЖЕРНОВА, А.В. ДУНАЕВ

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСОСУДИСТОГО КРОВОТОКА И ТКАНЕВОЙ САТУРАЦИИ ПРИ СПОРТИВНЫХ НАГРУЗКАХ

Данные об изменении показателей микроциркуляции (I_m) и тканевой сатурации (S_tO_2) могут быть использованы в качестве оценки адаптивных возможностей организма человека. Для повышения информативности следует использовать дополнительные комплексные параметры, такие как показатель шунтирования (ПШ) и индекс перфузионной сатурации кислорода в микрокровотоке (S_m). Изменения указанных параметров до определенных значений свидетельствуют, в некоторых случаях, о возникновении вазомоций, которые могут являться реакцией организма на спортивную нагрузку. Таким образом, появляется возможность корректировать тренировочный процесс спортсмена.

Ключевые слова: организм человека; показатель микроциркуляции; тканевая сатурация

Data on changes in indicators of microcirculation (I_m) and blood oxygen saturation (S_tO_2) can be employed as a measure of adaptive capacity of the human body. To enhance the information content should be used for more complex parameters, such as refractive index and BI bypass perfusion of oxygen saturation in microcirculation Sm. Changes to

these parameters indicate a certain value, in some cases, the occurrence vazomoutions which are reaction by the body naturally on sporting load. Thus, it is possible to manage the training process catfish.

Key words: human body; indicator of microcirculation; blood oxygen saturation

В мировых научных публикациях проявляется повышенный интерес к биоинженерным методам исследования процессов и механизмов работы организма человека. Это связано с возросшими техническими возможностями исследователей проводить новые эксперименты и опыты. Человеческий организм пока остаётся неизученным до конца, ввиду многообразия индивидуальных особенностей и уникальных способов адаптации к различным условиям.

Одним из основных предметов исследований является система микроциркуляции крови (МЦК) человека, используемая в качестве основного тест-объекта в функциональной диагностике организма благодаря многофакторности регулирования. В настоящее время для исследования МЦК существует несколько методов: лазерная доплеровская флоуметрия (ЛДФ), оптическая тканевая оксиметрия (ОТО), лазерная флуоресцентная диагностика (ЛФД), диффузионно-волновая спектроскопия, спекл-микроскопия, оптическая когерентная томография [1]. Методы ЛДФ и ОТО позволяют получить наиболее полную информацию для оценки перфузии и тканевой сатурации [2] и применяются в различных областях медицины (церебральная оксиметрия, спортивная медицина, медицина критических состояний) [3-4].

Целью данной работы является исследование возможностей применения методов ЛДФ и ОТО для оценки микрососудистого кровотока и тканевой сатурации после выполнения спортивных нагрузок, а также исследование регуляторных механизмов, отвечающих за приспособление к ним.

Для диагностики системы МЦК в данной работе применялся комплексный метод исследования, включающий в себя ЛДФ, ОТО и пульсоксиметрию (ПО). При зондировании ткани лазерным излучением в регистрируемом сигнале имеется составляющая, обусловленная отражением от движущихся эритроцитов, пропорциональная скорости их движения (эффект Допплера). Амплитуда сигналов формируется от всех эритроцитов, находящихся в области зондирования, движущихся с разными скоростями и по-разному количественно распределённых в артериолах, капиллярах, венулах и артериовенулярных анастомозах. Благодаря разнице оптических свойств оксигенированных и де-оксигенированых фракций гемоглобина, можно определять не артериальную, как в пульсоксиметрии, а смешанную артерио-венозную сатурацию оксигемоглобина в обследуем участке микроциркуляторного русла биоткани [4]. Показания тканевых оксиметров ближе даже к венозной сатурации оксигемоглобина, поэтому совместно с технологией пульсоксиметрии тканевая оксиметрия позволяет определять потребление кислорода клетками ткани.

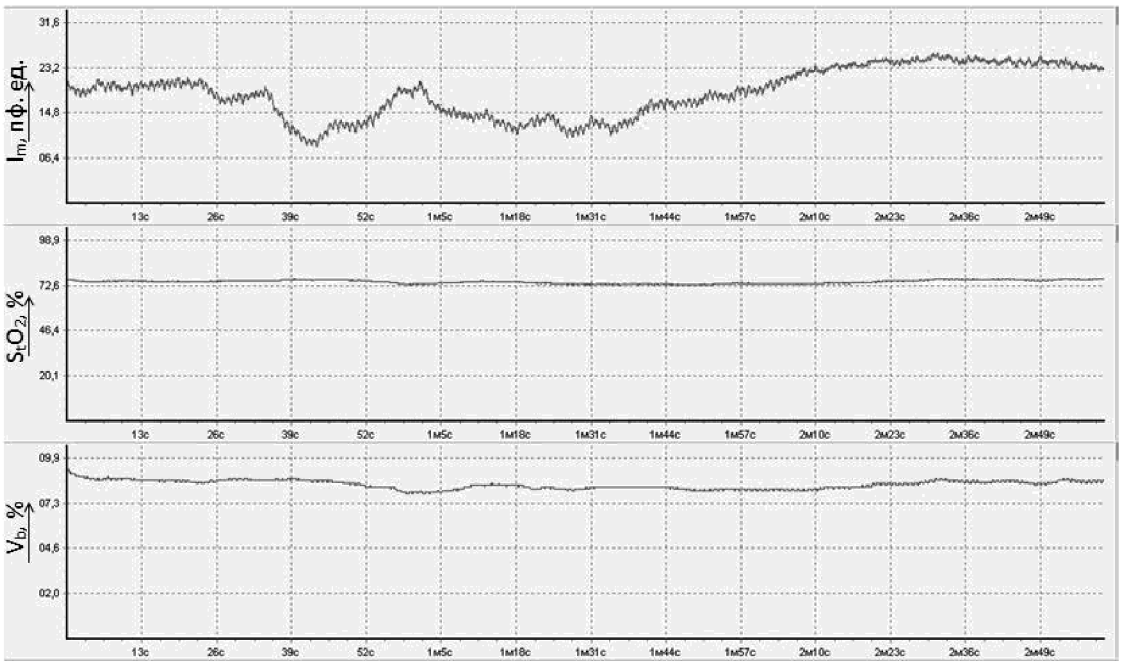
Как известно [4-5], активные механизмы регуляции, изменяющие мышечный сосудистый тонус – эндотелиальные, нейрогенные и миогенные – пространственно локализованы в микроциркуляторном русле. Они создают колебания кровотока в известных частотных диапазонах [6]. В свою очередь, наибольший интерес представляют колебания кровотока, происходящие в миогенном диапазоне. Миогенные колебания, как правило, синусоидальные. Целесообразность вазомоторных колебаний обосновывается тем, что при синусоидальном изменении мышечного тонуса сопротивление сосуда току жидкости меньше, чем сопротивление сосуда, имеющего постоянный диаметр. Следовательно, возрастание миогенных колебаний в ЛДФ-грамме свидетельствует о вазодилатации [7]. Чем больше амплитуда колебаний, тем ниже периферическое сопротивление. И, наоборот, уменьшение вазомоторных амплитуд вызывает повышение мышечного сопротивления и, следовательно, снижение нутритивного кровотока. В физиологической интеграции управления микрокровотоком именно миогенный тонус является последним звеном контроля микрокровотока перед капиллярным руслом.

Диагностическое значение миогенных колебаний состоит в оценке состояния мышечного тонуса прекапилляров, регулирующего приток крови в нутритивное русло. Метод ЛДФ позволяет оценивать компоненты тонуса микрососудов на основе величин амплитуд колебаний микрокровотока, которые обусловлены интенсивностью сокращений мышечной стенки сосуда, а значит, и диаметром просвета сосудов. Показатель шунтирования возможно оценить ввиду пространственной локализации воздействий нейрогенного механизма (мишенью являются артериолы и артериальный участок шунта) и миогенного механизма (мишень – прекапилляры). Показатель шунтирования увеличивается при увеличении миогенного тонуса, на фоне нормального или пониженного нейрогенного тонуса большая часть кровотока движется в обход нутритивного звена микроциркуляторного русла [8].

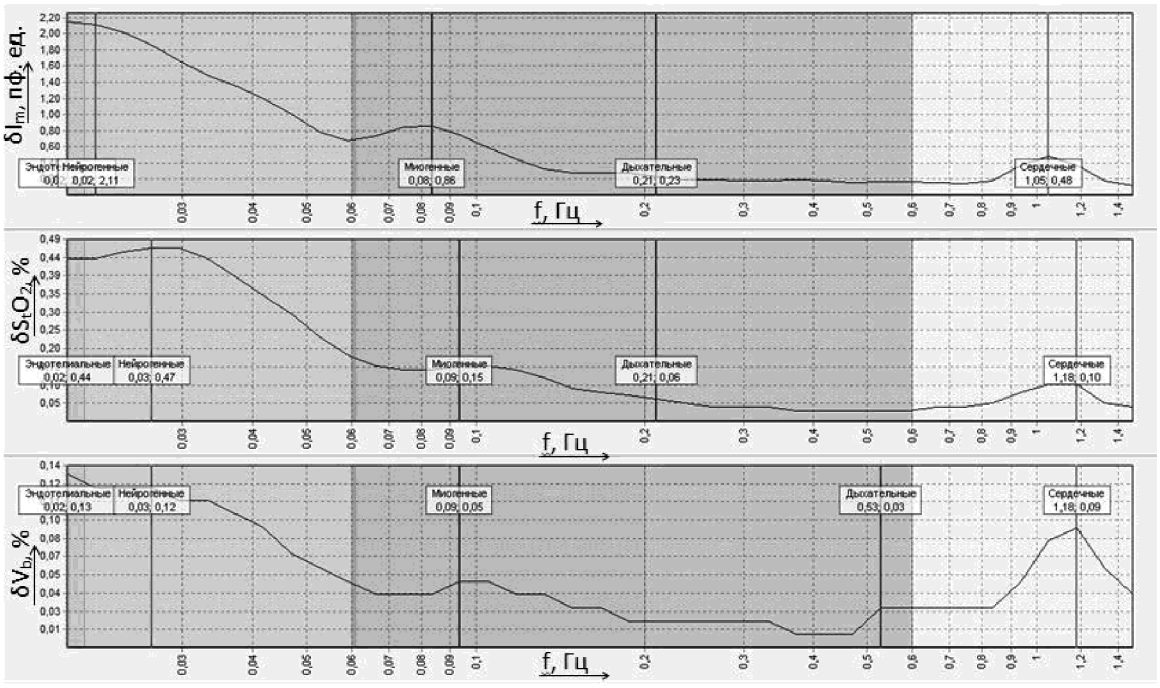
В тренировочно-соревновательном процессе все задачи по подготовке спортсмена к успешному выступлению на соревнованиях направлены на повышение спортивного мастерства через совершенствование технической и тактической подготовки спортсмена, улучшение его физической работоспособности, расширение функциональных возможностей организма и адаптивной устойчивости к внешним факторам [9]. Как известно, микрососудистое русло является конечной мишенью сердечно-сосудистой системы, где происходит транскапиллярный обмен, обеспечивающий необходимый тканевой гомеостаз [10]. Потребление энергии работающими мышцами в ходе тренировочного процесса требует синхронной доставки кислорода с участием системы микрогемоциркуляции. Сегодня уже хорошо известно, что кровоток в микроциркуляторном русле подвержен колебаниям, которые отражают текущее функциональное состояние систем его регуляции [3; 11]. Изменчивость перфузии отражается на физиологическом состоянии биоткани. Это позволяет подойти к тренировочному процессу как к исследованию вазомоций миогенных колебаний.

Экспериментальные исследования проводились с помощью многофункционального лазерного диагностического комплекса «ЛАКК-М» (НПП «ЛАЗМА», г. Москва), имеющего четыре канала измерения, основанные на методах ЛДФ, ОТО, ПО и ЛФД. Комплекс «ЛАКК-М» предназначен для комплексного исследования состояния биологической ткани путём одновременного использования нескольких неинвазивных методов диагностики. Основными измеряемыми параметрами при этом были перфузия (I_m), тканевая сатурация (S_tO_2), и кровенаполнение (V_b). В программном обеспечении регистрации и обработки ЛДФ-грамм предусмотрен амплитудно-частотный анализ ритмов микрокровотока, позволяющий диагностировать активность определенного механизма регуляции (версия ПО 3.0.2.384).

Тестовые эксперименты проводились на волонтере – мужчине 36 лет, условно-здоровом добровольце, при этом предварительная спортивная подготовка отсутствовала. Оптический датчик (волокно) закреплялся на валярной поверхности среднего пальца правой руки с помощью специальной клипсы. Измерения проводились в два этапа: тест в состоянии покоя (базовый тест – БТ) и тест после физической нагрузки. Тест в состоянии покоя проводился в одно время около 12.00. В качестве физической нагрузки было выбрано плавание на дистанцию 500 метров длительностью 30 минут во второй половине дня; после этого проводились повторные измерения спустя 15-20 минут после бассейна в течение 40-50 минут. Пример типичной записи перфузии, тканевой сатурации, кровенаполнения и их спектров приведен на рисунке 1.



а)



б)

Рисунок 1 – Пример типичной записи перфузии, тканевой сатурации, кровенаполнения (а) и их спектров (б)

Кроме того, был проведён отдельный анализ полученных данных во времени. Для этого были выделены дни, когда у волонтера после физических нагрузок наблюдались повышенные осцилляции микрокровотока и тканевой сатурации в миогенном диапазоне. После плавания проводилось от 4 до 12 измерений ЛДФ- и ОТО-грамм в течение одного часа. Таким образом, представилось возможным построить графики в зависимости от времени таких параметров как перфузия (I_m), сатурация (S_tO_2), относительный объём фракции эритроцитов (V_b), частотные и амплитудные составляющие миогенных колебаний перфузии и тканевой сатурации, а также комплексный параметр – индекс перфузионной сатурации кислорода в микрокровотоке:

$$S_m = S_tO_2 / I_m, \quad (1)$$

где S_tO_2 – сатурация микрокровотока;

I_m – среднее значение перфузии.

Всего было проведено и обработано 192 эксперимента. В одной из серий было проведено 13 измерений: базовый тест до занятий плаванием и 12 «после» в течение 69 минут Результаты расчёта основных параметров микроциркуляции представлены в таблице 1. Выделенные значения в таблице являются случаями возникновения вазомоций [10], т.е. синхронизации и резонанса амплитуд колебаний в миогенном диапазоне.

Таблица 1 – Результат измерения основных параметров в одной серии эксперимента

Параметр	t, мин	I_m, пф.ед.	S_tO_2, %	V_b, %	S_m, отн.ед.	ПШ, отн. ед.
БТ	-	23,6	72,7	8,8	3,1	1,764
1	0	17,9	81,9	11,6	4,6	1,343
2	9	18,7	73,3	10,2	3,9	1,594
3	**14**	**21,3**	**73,7**	**10,3**	**3,5**	**0,980**
4	**19**	**21,8**	**78,2**	**10,5**	**3,6**	**0,923**
5	**23**	**23**	**74,1**	**10,1**	**3,2**	**0,951**
6	39	21,1	77,9	10,5	3,7	1,159
7	44	19,6	76,6	11,1	3,9	2,346
8	50	22,6	77	10,4	3,4	1,091
9	**57**	**23,8**	**71,7**	**10,4**	**3**	**0,934**
10	61	21,8	72,1	10,3	3,3	1,759
11	65	23,5	73,7	11,1	3,1	1,024
12	69	21,3	74,2	10,9	3,5	1,328

На рисунке 2 показан типичный пример спектров ЛДФ- и ОТО-грамм с синхронизацией и резонансом миогенных колебаний, соответствующий измерению 3 в таблице 1.

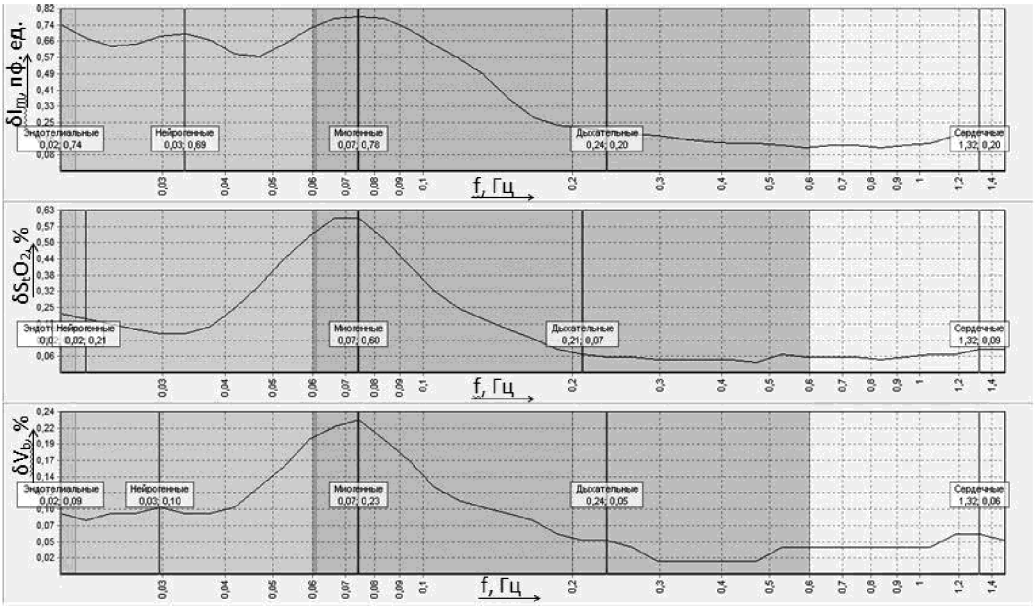
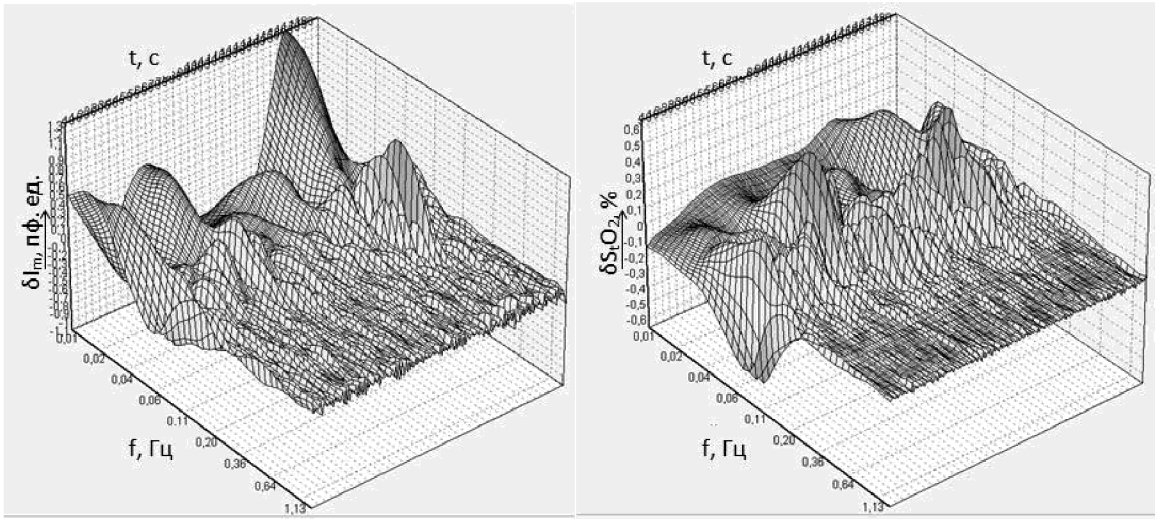


Рисунок 2 – Типичный пример спектров ЛДФ- и ОТО-грамм с синхронизацией и резонансом миогенных колебаний

На рисунке 3 показан пример построения с помощью ПО «ЛАКК-М» 3D-модели на основе вейвлет-анализа [11] с синхронизацией ритмов микрокровотока (*а*) и сатурации кислорода (*б*) в миогенном диапазоне в случае спортивной нагрузки. Приведённый пример является типовым случаем возникновением вазомоторного механизма регуляции в системе МЦК при спортивной нагрузке.



а) *б*)

Рисунок 3 – Типичный пример построения 3D-модели, полученной с помощью вейвлет-анализа, синхронизации ритмов микрокровотока (а) и сатурации кислорода (б) в миогенном диапазоне в случае спортивной нагрузки

Одновременный анализ показателя микроциркуляции и тканевой сатурации может быть использован в качестве оценки адаптивных возможностей организма спортсмена во время тренировочного процесса. При этом оценка изменений миогенных колебаний, как в перфузии, так и в тканевой сатурации, является достаточно информативной при корректировке тренировочного процесса в период подготовки к различным соревнованиям. Таким образом, с помощью предложенного подхода оценки физического состояния организма можно анализировать физические нагрузки на человека неинвазивно и относительно быстро, что может являться, на наш взгляд, информативным и эффективным для спортивной медицины.

ЛИТЕРАТУРА

1 Тучин, В.В. Оптическая биомедицинская диагностика [Текст] / В.В. Тучин. – В 2-х томах. – Т.1. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 518 с.

2 Рогаткин, Д.А. Физические основы оптической оксиметрии [Текст]: Лекция / Д.А. Рогаткин // Медицинская физика. – 2012. – №2. – С. 97-114.

3 Пика, Т.О. Расчётные параметры тканевой оксиметрии в медицине критических состояний [Текст] / Т.О. Пика, Л.П. Сафонова // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2012. – №10. – С. 53-62.

4 Сидоров, В.В. Комплексное исследование микрогемодинамики и транспорта кислорода в системе микроциркуляции крови. Диагностические показатели [Текст] / В.В. Сидоров, А.И. Крупаткин, Д.А. Рогаткин // Ангиология и сосудистая хирургия. – 2008. – Т.1. – №3. – С. 141.

5 Stefanovska, A. Physics of the human cardiovascular system [Text] / A. Stefanovska, M. Bracic // Contemporary Physics. – 1999. – V. 40. – №1. – P.31-35.

6 Овчинникова, О.А. Оценка гендерных особенностей вегето-сосудистой регуляции микроциркуляции методом лазерной допплеровской флоуметрии [Текст] / О.А. Овчинникова // Ярославский педагогический вестник. – 2010. – №3. – С. 51-55.

7 Mayer, M.F. Impaired 0.1 Hz Vasomotion Assessed by Laser Doppler Anemometry as an Early Index of Peripheral Sympathetic Neuropathy in Diabetes [Text] / M.F. Mayer, C.J. Rose, J.-O. Hulsmann [et al.] // Microvasc. Res. – 2003. – Vol. 65. – P. 88.

8 Bernjak, A. Coherence between fluctuations in blood flow and oxygen saturation [Text] / A. Bernjak, A. Stefanovska, P.V. McClintock, P.J. Owen-Lynch, P.B. Clarkson // Fluctuation and Noise Letters. – 2012. – Vol. 11. – №1. – P. 154.

9 Лазерная допплеровская флоуметрия микроциркуляции крови [Текст]: Руководство для врачей / Под ред. А.И. Крупаткина, В.В. Сидорова, М.: Медицина, 2005. – 256 с.

10 Литвин, Ф.Б. Сердечный ритм и система микроциркуляции у лыжников в предсоревновательном периоде спортивной подготовки [Текст] / Ф.Б. Литвин [и др.] // Вестник Удмуртского университета. – 2012. – №1. – С. 67-74.

11 Поленов, С.А. Основы микроциркуляции [Текст] / С.А. Поленов // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. – 2008. – Т.7. – №1(25). – С. 5-19.

12 Козлов, В.И. Система микроциркуляции крови: клинико-морфологические аспекты изучения [Текст] / В.И. Козлов// Регионарное кровообращение и микроциркуляция. – 2006. – Т.5. – №1(17). – С. 84-101.

13 Thorn, C.E. An association between vasomotion and oxygen extraction [Text] / C.E. Thorn, H. Kyte, D.W. Slaff, A.C. Shore // Am J Physiol Heart Circ Physiol. – 2011. – Vol.301(2). – P. 442-449.

14 Танканаг, А.В. Адаптивный вейвлет-анализ колебаний периферического кровотока кожи человека [Текст] / А.В. Танканаг, Н.К. Чемерис // Биофизика. – 2009. – Т.54. – №3. – С. 537.

Жернова Любовь Александровна
ФГБОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК», город Орёл, Россия
аспирантка кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация», магистр
телефон 8(4862)41-98-76; E-mail: ala_id@mail.ru

Дунаев Андрей Валерьевич
ФГБОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК», город Орёл, Россия
Университет Данди, Великобритания
доцент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»,
научный сотрудник университета Данди,
кандидат технических наук, доцент
телефон 8(4862)41-98-76; E-mail: a.v.dunaev@dundee.ac.uk

УДК 620.179.1.082.7:658.58

К.В. ПОДМАСТЕРЬЕВ, В.В. МАРКОВ

ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ПОДШИПНИКА КАЧЕНИЯ НА СТАБИЛЬНОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

Представлены результаты экспериментальных исследований состояния смазки в подшипнике качения при его приработке с различными частотами вращения. Даны рекомендации по рациональному выбору значений частоты при реализации электрорезистивных методов диагностирования подшипников качения.
Ключевые слова: подшипник качения; частота вращения; смазочная плёнка

The results of experimental researches of condition the film of lubricate in the bearing of rolling by his supplementary with the different frequencies of rotation is produced. The recommendation by rational choice the significances of frequency of rotation by realization the electro resistive methods of diagnostically the bearings of rolling is gives.
Key words: bearing of rolling; частота вращения; смазочная плёнка

Электрорезистивный метод диагностирования подшипников основан на использовании параметров функции его электрического сопротивления $R(t)$ в качестве диагностических. Функция $R(t)$ зависит от многих факторов и чувствительна к их нестабильности. Методики экспериментальных исследований и практического диагностирования должны обеспечивать незначительное влияние нестабильности неинформативных факторов на результаты.