

УДК 616.12.008.331-073.65.78

И.О.КОЗЛОВ, Е.А.ЖЕРЕБЦОВ, А.В.ДУНАЕВ,
I.O.KOZLOV, E.V.ZHEREBTSOV, A.V.DUNAEV

УСТРОЙСТВО НА ОСНОВЕ СВЕТОДИОДОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПРИБОРОВ ЛАЗЕРНОЙ ДОПЛЕРОВСКОЙ ФЛОУМЕТРИИ LED-BASED DEVICE FOR THE TECHNICAL STATE INSPECTION OF THE LASER DOPPLER FLOWMETRY MONITORS

В данной статье авторами описаны подходы к построению тест-объектов для контроля технического состояния приборов лазерной доплеровской флоуметрии (ЛДФ). Создание нового тест-объекта для широкого использования в медицинских учреждениях позволит решить проблему распространения метода ЛДФ и его метрологического обеспечения.

Ключевые слова: лазерная доплеровская флоуметрия, тест-объекты, метрологическое обеспечение, контроль технического состояния

In this article the authors describes approaches to the construction of test-object for verification of operability of devices laser Doppler flowmetry. Creating a new test object for wide use in medical institutions will solve the problem of sharing method LDF and its metrological support.

Keywords: laser Doppler flowmetry, test objects, metrological support, technical state inspection.

Широко применяемый в настоящее время метод лазерной доплеровской флоуметрии (ЛДФ) позволяет оценить интенсивность периферического кровотока в микроциркуляторном русле. Единицей измерения в ЛДФ является «показатель микроциркуляции» (ПМ) — величина, которая выражается в относительных перфузионных единицах, и пропорциональна средней концентрации ансамбля эритроцитов и их средней скорости. Физически, ПМ представляет собой зарегистрированную мощность переменного сигнала с фотоприёмника, которая выделяется за счёт фотосмещения сигналов с опорной и сдвинутой за счёт эффекта Доплера (в полосе от 1 Гц до 24 кГц) частотами. Регистрируемый прибором ЛДФ сигнал изменения перфузии по времени состоит из двух основных составляющих: переменной и постоянной. Постоянная составляющая — это средняя перфузия крови за выбранный интервал времени. Переменная составляющая сигнала обусловлена физиологическими факторами регуляции кровенаполнения и отражает частотные ритмы регуляции кровотока (флаксмоции). Обе составляющие важны для диагностирования целого ряда заболеваний. По косвенным признакам исследователь может оценить различные заболевания периферийной нервной системы, ответственной за колебания микрососудистого русла. Поэтому данный метод в настоящее время востребован и развивается [1].

Регистрируемый в методе ЛДФ показатель микроциркуляции рассчитывается следующим образом:

$$I_m = K_{\text{пр}} \frac{\int_0^{\omega_{\text{max}}} \omega P(\omega) d\omega}{i_{dc}^2}, \quad (1)$$

где в подынтегральном выражении записана мощность ($P(\omega)$), приходящаяся на каждую частоту доплеровского сдвига, а приборный коэффициент ($K_{\text{пр}}$) и квадрат составляющей фототока (i_{dc}) являются методическими.

Однако, в настоящее время в методе ЛДФ существует проблема, заключающаяся в том, что по-прежнему отсутствуют точные, удобные и недорогие устройства (тест-объекты,

оптические фантомы) для контроля технического состояния приборов ЛДФ. Поэтому для дальнейшего развития и более широкого применения ЛДФ актуальной задачей является разработка устройств, имитирующих доплеровский сдвиг от движущихся эритроцитов. Предполагаемый тест-объект должен обеспечить возможность оперативно и комплексно контролировать техническое состояние как оптической, так и электронной частей ЛДФ канала. В частности, он должен воспроизводить постоянную и переменную составляющие перфузии, так как для диагностики ряда заболеваний существует потребность в точной оценке колебаний в кровенаполнении сосудов. Другими немаловажными требованиями являются универсальность и удобство в эксплуатации. Также в рамках данного устройства должна быть выполнена функция управления уровнем воспроизводимой перфузии. Таким образом, целью данной работы явился анализ существующих подходов для контроля технического состояния приборов ЛДФ и предложение нового принципа построения тест-объектов, лишённых существующих недостатков [2].

В настоящее время в качестве тест-объектов в ЛДФ наиболее широко используют коллоидные растворы светорассеивающих частиц, которые моделируют движение форменных элементов крови (ФЭК) за счёт броуновского движения. При этом нормируют их концентрацию, а скорость броуновского движения вычисляют за счёт теоретических зависимостей от температуры и параметров формы частицы. Примером подобных устройств является тест-объект «Motility Standard» («Perimed AB», Швеция) [3]. Однако, данный тест-объект нестабилен во времени, может «высохнуть», или иным образом изменить собственные параметры. Кроме того, данный тест-объект не универсален, то есть, для полной проверки характеристики нужен набор мер, воспроизводящих нужный уровень перфузии. Проведённые с помощью «Motility Standard» экспериментальные исследования по периодическому контролю технического состояния ЛДФ-канала (длина волны зондирования – 1064 нм) многофункционального лазерного неинвазивного диагностического комплекса (МЛНДК) «ЛАКК-М» (ООО НПП «ЛАЗМА», г. Москва) продемонстрировали основные методологические недостатки данного подхода (рисунок 1).

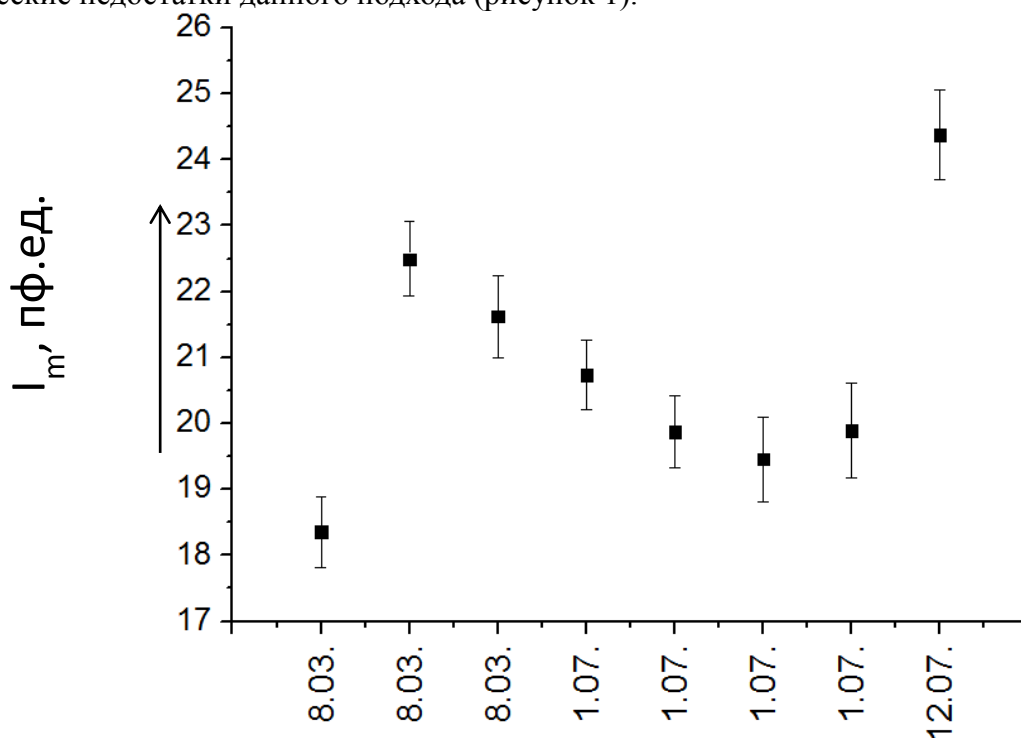


Рисунок 1 – Результаты периодического контроля технического состояния ЛДФ-канала МЛНДК «ЛАКК-М» с помощью «Motility Standard»

Эксперименты проводились циклами на протяжении нескольких месяцев. Волокно ЛДФ-канала погружалось в калибровочный гель и проводилась 30 мин запись ЛДФ-сигнала. Одной из возможных причин полученного достаточно большого разброса результатов являются разнообразные методические погрешности, например, сложность контроля заглубления волокна в гель. Также, возможно, что гель изменил свои характеристики с течением времени (как правило, срок службы геля – не более полугода). Кроме того, можно предположить, что сам ЛДФ-канал может быть неисправен (изменение мощности зондирования, чувствительности фотоприёмных каналов и т.д.), однако на основе полученной информации невозможно сделать однозначное заключение.

Другим подходом для контроля технического состояния приборов ЛДФ является применение устройства, основанного на вращении светорассеивающих дисков [4]. Каждый диск обладает 4-мя особыми круглыми зонами рассеяния, располагающимися под прямым углом. Количество дисков равно 3, причём зоны на каждом диске обладают различающимися параметрами рассеяния. Доплеровский сдвиг формируется приёмом обратно рассеянной на этих зонах световой волны. Данный подход обладает рядом недостатков, а именно: сложная конструкция (диски обладают толщиной 22 мкм), при быстром вращении может происходить биение дисков, то есть отклонение их плоскости вращения; кроме того, механический привод со временем может подвергнуться износу.

Следующим подходом для проведения контроля технического состояния приборов ЛДФ является применение тест-объекта, основанного на рассеянии света на колеблющейся светорассеивающей поверхности [5]. Светорассеивающий отражатель приводится в движение электромеханическим преобразователем – пьезоактюатором – с частотой колебаний от 0 до 100 Гц. Отражатель представляет собой пластину, характеризующуюся ламбертовским рассеянием, выполненную из полимера с объёмно-распределёнными микрочастицами. Лазерное излучение проходит сквозь светопрозрачную пластину, отражается от светорассеивающего слоя и попадает в фотоприёмник прибора ЛДФ. Для исключения засветки от поверхностей устройства может быть введён дополнительный светопоглощающий слой. Также в данном тест-объекте реализована возможность воспроизведения колебаний кровенаполнения (флаксмоций) в микроциркуляторном русле в диапазоне от 0,01 до 2 Гц. Варьируя режимы работы, существует возможность имитировать разнообразные постоянные и переменные составляющие. Данный тест-объект позволяет произвести контроль технического состояния прибора ЛДФ и провести метрологический контроль его состояния. В целом, это действенный и высококачественный метод, однако широкому его использованию препятствует высокая стоимость пьезоактюаторов и сложность в эксплуатации.

На основе проведенного анализа достоинств и недостатков существующих тест-объектов, с учётом ранее высказанного предположения [6], предлагается новый подход к решению проблемы контроля технического состояния ЛДФ-каналов, заключающийся в разработке устройств, основанных на импульсном режиме работы светоизлучающих диодов (СИД). Для оценки возможностей предложенного принципа работы тест-объекта был собран экспериментальный макет с СИД на разных длинах волн (рисунок 2). Эмпирически было подобрано расстояние от торца волокна до СИД (3 мм) и оптимальный цвет свечения СИД – красный. Основной причиной выбора красного СИД является тот факт, что широкополосный диапазон испускаемых им световых волн попадает в рабочий ближний ИК-диапазон ЛДФ-канала МЛНДК «ЛАКК-М», используемого в данных тестовых экспериментах. Изменяя частоту импульсов СИД, существует возможность воспроизведения перфузии на разных уровнях. Волокно ЛДФ-канала фиксируется и направляется на СИД под определённым углом. Выбираются различные несущие и модулирующие частоты импульсов, скважность

зондирующего сигнала. Светодиоды запитываются от источника тока, управляемого напряжением. В ЛДФ-канале МЛНДК «ЛАКК-М» периодическое изменение мощности светового потока от СИД регистрируется как доплеровский сдвиг.

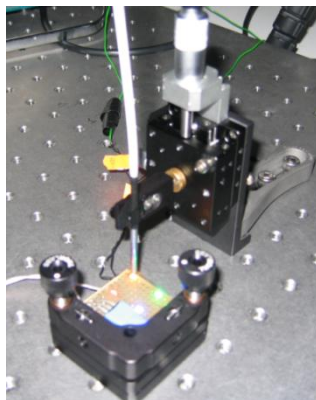


Рисунок 2 – Внешний вид экспериментального макета тест-объекта на основе СИД

Вид типичной ЛДФ-граммы, полученной с помощью макета представлен на рисунке 3. Также был проведён цикл исследований зависимости воспроизводимой перфузии от частоты доплеровского сдвига (в данном случае – от частоты импульсов СИД). Известно, что существует линейный участок данной зависимости, что подтвердилось экспериментально в диапазоне частот импульсов СИД от 0 до 1600 Гц для красного светодиода (рисунок 4). Разрабатываемое устройство должно обеспечивать воспроизведение постоянной и переменной составляющих перфузии и проверять амплитудно-частотную характеристику фотоприёмного канала с необходимой точностью. В дальнейшем предполагается разработка математической модели воспроизведения перфузии посредством изменения частоты импульсов СИД и отработка конструкции тест-объекта.

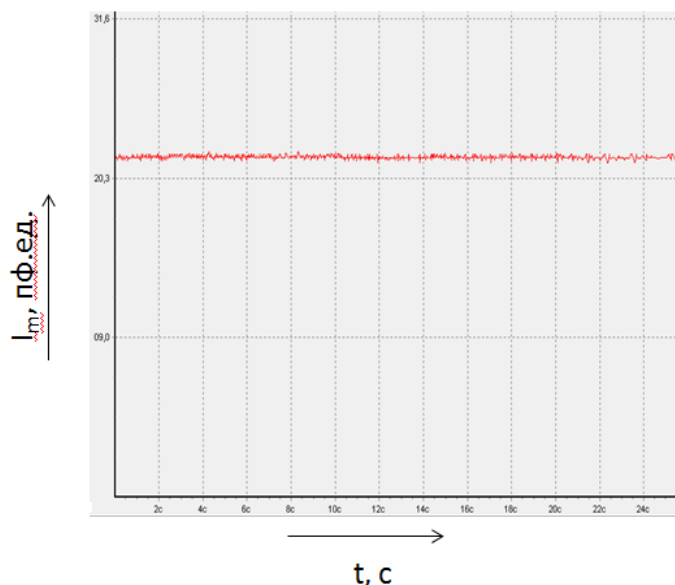


Рисунок 3 – Вид типовой ЛДФ-граммы, полученной с помощью экспериментального макета

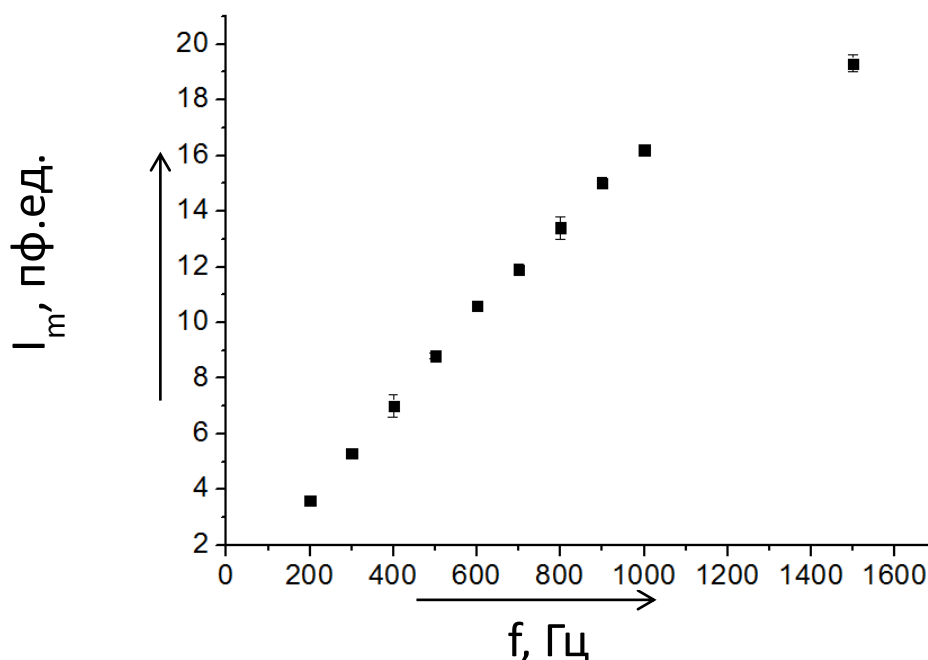


Рисунок 4 — Зависимость воспроизводимой перфузии от частоты импульсов СИД

Таким образом, предложенный новый подход, заключающийся в использовании СИД в концепции построения тест-объекта для контроля технического состояния приборов ЛДФ, является, на наш взгляд, перспективным, так как позволяет с наименьшими затратами и трудоёмкостью воспроизводить ЛДФ-сигнал. Дальнейшее совершенствование метрологического обеспечения лазерной доплеровской флоуметрии поднимет данную диагностическую технологию на новый качественный уровень.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крупаткин А.И., Сидоров В.В. Функциональная диагностика микроциркуляторно-тканевых систем: Колебания, информация, нелинейность // М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ». 2013.— 496 с.
2. Рогаткин Д.А., Дунаев А.В., Лапаева Л.Г. Метрологическое обеспечение методов и приборов неинвазивной медицинской спектрофотометрии // Медицинская техника, 2010. №2. С.31-36.
3. Fredriksson I., Larsson M., Salomonsson F., Stromberg T. Improved calibration procedure for laser Doppler perfusion monitors // Proc. SPIE 7906, 790602 (2011); doi:10.1117/12.871938.
4. Larsson M., Steenbergen W., Stromberg T. Influence of Optical Properties and Fiber separation on Laser Doppler Flowmetry // Journal of Biomedical Optics, 2002. №7. С.236-243.
5. Дунаев А.В., Жеребцов Е.А., Рогаткин Д.А. Принципы построения тест-объекта для метрологического контроля состояния приборов лазерной доплеровской флоуметрии // Биомедицинская радиоэлектроника, 2012. №1. С.8-16
6. Liebert A., Lukasiewicz P., Boggett D., Maniewski R., Optoelectronic standardization of laser Doppler perfusion monitors // Review of Scientific Instruments, 1999. №2. С.1352-1354.

Козлов Игорь Олегович

ФГБОУ ВПО «Госунiversитет-УНПК», г. Орёл, Россия
Студент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»
Тел.: 8 920 814 04 58
E-mail: igor57_orel@mail.ru

Жеребцов Евгений Андреевич

ФГБОУ ВПО «Госунiversитет-УНПК», г. Орёл, Россия
Научный сотрудник научно-образовательного центра «Биомедицинская инженерия», ассистент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»
Тел.: 8 953 361 51 92
E-mail: zherebzow@gmail.com

Дунаев Андрей Валерьевич

ФГБОУ ВПО «Госунiversитет-УНПК», г. Орёл, Россия
Ведущий научный сотрудник научно-образовательного центра «Биомедицинская инженерия», к.т.н., доцент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»
Тел.: (4862) 41 98 76
E-mail: dunaev@bmecenter.ru