

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСНЫХ СВОЙСТВ МЯГКИХ УПРУГИХ ТКАНЕЙ ГОЛЕНИ МЕТОДАМИ ВИБРАЦИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ

СМИРНОВ Д.С., асп., МАСЛОВ Л.Б., ШАПИН В.И., кандидаты техн. наук, САБАНЕЕВ Н.А., инж.

Представлены результаты разработки оригинального экспериментального оборудования и метод активной вибрационной диагностики мягких упругих тканей голени человека. Представлены результаты исследования резонансных свойств мягких тканей как сложной биомеханической системы, образованной камбаловидной и икроножной мышцами совместно с ахилловым сухожилием. Определены формы колебаний и резонансные частоты сухожильно-мышечного комплекса.

Ключевые слова: резонансные свойства живых тканей, диагностика, ахиллово сухожилие, электромагнитный вибрационный стенд, амплитудно-частотные характеристики.

THE RESEARCH OF CRUS SOFT ELASTIC TISSUES RESONANT BEHAVIOUR WITH THE HELP OF VIBRATION DIAGNOSTICS METHODS

D.S. SMIRNOV, postgraduate, L.B. MASLOV, Ph.D., V.I. SHAPIN, Ph.D., N.A. SABANEEV, engineer

This paper represents the results of original experimental equipment development and the method of active vibration diagnostics of a man's crus soft elastic tissues. This research contains the results of soft tissues resonant behavior analyses as a complex biomechanical system, which was formed with salens muscle and gastrocnemius one simultaneously with heel tendon. The authors of this paper have determined the mode shapes and resonant frequencies of tendomuscular system.

Key words: alive tissues resonant behavior, diagnostics, heel tendon, electromagnetic vibration bed, amplitude-frequency characteristics.

Введение и общая постановка задачи. Вопросам исследования резонансных свойств живых тканей уделяется значительное внимание с 80-х гг. прошлого века [1–3]. Актуальность этой проблемы связана как с фундаментальными задачами биомеханики сплошных сред, так и с практическими приложениями вибрационных методов контроля восстановления поврежденных тканей опорно-двигательного аппарата человека [4–6]. Развиваемые в настоящее время методы механической вибростимуляции и разрабатываемые на их основе приборы и установки (например, известный российский аппарат «Витафон» или голландская установка Galileo2000) также предполагают углубленный теоретический анализ резонансных свойств живых тканей.

Ахиллово сухожилие, приводящее в движение стопы человека, является самым крупным соединительным элементом опорно-двигательного аппарата. Его повреждение приводит к серьезным нарушениям двигательной функции стопы, лечение разрыва сухожилия и восстановление нормального функционирования нижней конечности требуют значительных финансовых и временных затрат. Определенные трудности возникают при диагностике закрытых повреждений ахиллова сухожилия, которая, как правило, основывается на клинических данных. Диагностические ошибки при данном виде повреждений встречаются в 63 % случаев. Самым распространенным способом диагностики является мануальный метод, при котором точность определения повреждения напрямую зависит от квалификации врача. Современные методы анализа, такие, как рентгеновские, радиоизотопные (ядерно-магнитная томография), достаточно дорогие, имеют строгие ограничения на частоту применения и при этом не гарантируют обнаружения частичного или полного разрыва волокон соединительной ткани.

Ранее нами был разработан метод активной вибрационной диагностики состояния ахиллова сухожилия, основанный на контактных способах возбуждения и регистрации резонансных механических колебаний икро-

ножной мышцы [7–9]. Согласно разработанному методу нога обследуемого пациента располагается горизонтально, возбуждение производится контактным способом при помощи электродинамического вибратора. Датчик-акселерометр регистрирует установившиеся колебания ахиллова сухожилия, отображаемые в виде амплитудно-частотной характеристики системы. Данный способ имеет определенные недостатки: наличие собственной частоты колебаний штока вибратора; ограниченность нижнего предела частоты сканирования; наличие точек контакта вибратора с объектом изучения. В процессе исследования это может привести к получению недостоверных данных, что отрицательно скажется на точности диагностики повреждения мягких тканей.

Поэтому было разработано оригинальное экспериментальное оборудование для реализации метода активной вибрационной диагностики мягких упругих тканей голени. Ниже представлены техническое описание установки и результаты исследования резонансных свойств мягких тканей как сложной биомеханической системы, образованной камбаловидной и икроножной мышцами совместно с ахилловым сухожилием. Определены первые формы колебаний и резонансные частоты сухожильно-мышечного комплекса. Проведено сравнение с ранее полученными результатами.

Техническое описание вибрационного стенда. Требования к устройству. Исходя из рассмотренных методов вибрационного контроля состояния мягких тканей, необходимо, чтобы техническая реализация стенда вибродиагностики повреждений сухожильно-мышечного комплекса голени отвечала следующим требованиям:

- достаточная степень точности диагностики разрыва сухожилия;
- малая стоимость стенда и простота использования;
- безболезненность исследования;
- минимальная площадь поверхности живых тканей, задействованных в диагностике, и наименьшее

количество точек соприкосновения тканей и средств исследования;

– возможность перехода к реабилитации поврежденного места.

Необходимо отметить, что точность распознавания и анализ характера повреждения мягких тканей зависит не только от методики проведения исследования поврежденной области, но и от наработанной базы данных по аналогичным исследованиям. Точность диагностики в этом случае опирается не столько на вид резонансных характеристик поврежденной конечности, сколько на отличие полученных характеристик от стандартного набора данных, принятых за эталон. Разумеется, этому предшествует длительный набор и статистическая обработка результатов для соответствующих возрастных, весовых и габаритных рамок пациентов.

Малая стоимость стенда определяется применением стандартных недорогих устройств, обеспечивающих точное и качественное определение необходимых физико-механических характеристик тканей. Такими устройствами в предложенной модификации стенда [8] выступают звуковая плата компьютера, предварительный усилитель 1,5 Вт и усилитель мощности 15 Вт, системы возбуждения и регистрации, выполненные на базе электрической катушки и магнита, прикрепленного к объекту исследования. Интеграцию всей системы исследования выполняет программное обеспечение, написанное на языке программирования Delphi.

Под наименьшей площадью поверхности живых тканей, задействованных в диагностике, понимается минимальное воздействие на объект исследования. При несоблюдении этого условия на резонансную характеристику объекта исследования накладываются искажения. Иными словами, весь биомеханический комплекс, включающий объект исследования и устройство исследования, обладает характеристикой, отличной от характеристики объекта исследования. Таким образом, установить факт повреждения становится гораздо сложнее. В данном случае минимизация площади задействованных в диагностике живых тканей достигается с помощью контактного способа крепления магнитов возбуждителя и датчика. Первый крепится с помощью геккорингов в районе голеностопного сустава, второй – двусторонним скотчем в месте соединения ахиллова сухожилия с икроножной мышцей.

Большое количество точек соприкосновения может исказить и амплитудно-частотную характеристику объекта исследования. При проектировании стенда количество контактов средств и объекта исследования было сведено к минимуму. В дальнейшем удалось вообще отказаться от механического возмущения объекта исследования, воздействуя на объект следующим образом: синусоидальный сигнал определенной частоты в усиленном виде подается на электромагнитную катушку, в катушке наводятся электродвижущие силы, которые приводят в возвратно-поступательное движение магнит, закрепленный на ахилловом сухожилии.

Простота и удобство работы со стендом достигаются за счет использования автоматически настраиваемых и регулируемых устройств исследования, что значительно снижает время диагностики, облегчает анализ полученных результатов и одновременно уменьшает риск ошибочного диагноза. Это достигается и за счет применения оригинального программного обеспечения, позволяющего оперативно учитывать антропометрические особенности пациента, возраст и определять вероятность разрыва.

Безболезненность исследования обеспечивается минимизацией амплитуды воздействия на область исследования. Достичь этого можно, варьируя уровень сигнала, подаваемого на катушку возбуждения. При наличии достаточного опыта исследования потенциально поврежденных сухожилий возможно применение автоматического регулирования уровня возмущающего сигнала.

Кроме диагностики повреждения ахиллова сухожилия, возможно также применение стенда для реабилитации пациентов в послеоперационный период (разработка (увеличение эластичности) прооперированных сухожилий). Можно предположить, что воздействие на мягкие ткани следует производить на частотах, соответствующих резонансным частотам сухожильно-мышечного комплекса голени пациента.

Описание устройства. За основу предложенного устройства был принят электродинамический вибрационный стенд, описанный в ранее опубликованных статьях [8–9]. Модифицированная конструкция стенда представлена на рис. 1 и обладает следующими характерными отличиями.

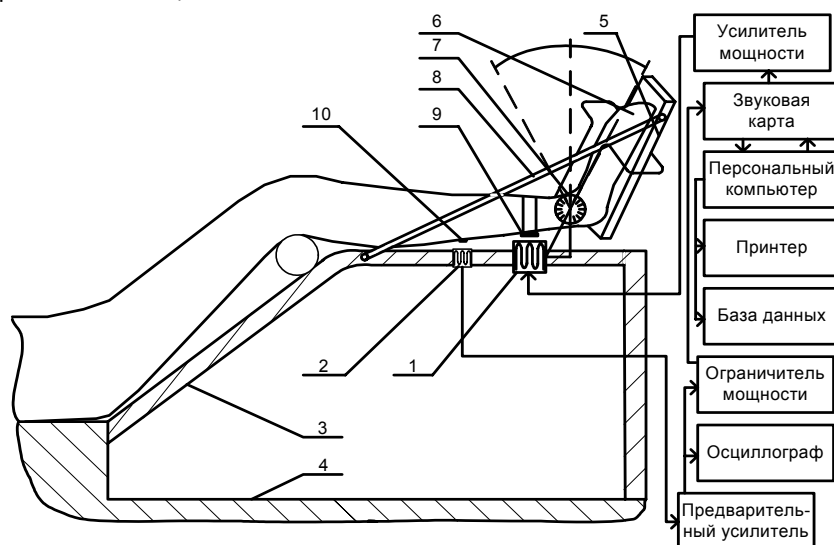


Рис. 1. Блок схема электромагнитного вибрационного стенда: 1 – катушка возбуждения; 2 – катушка датчика; 3 – опорная шина; 4 – кушетка; 5 – поворотная площадка для фиксации стопы; 6 – стопа; 7 – ось поворота стопы; 8 – поворотный механизм; 9 – магнит возбуждителя; 10 – магнит датчика

Во-первых, контактный метод воздействия на исследуемый объект заменен способом, минимально влияющим на собственные резонансные свойства объекта исследования. Электродинамический вибратор, передававший колебания посредством металлического штыря, упирающегося в ахиллово сухожилие, был заменен электромагнитным устройством, представляющим собой электрическую катушку (1) и постоянный магнит (9), закрепленный на поверхности голени в непосредственной близости от ахиллова сухожилия. Таким образом удалось избежать влияния собственной динамической характеристики вибратора на амплитудно-частотную характеристику исследуемого объекта. Устранение влияния нелинейного преобразования электрического сигнала на физическую движущую силу, было выполнено путем ввода погрешностной характеристики. Вид этой кривой удалось получить в результате тестирования комплекса «электрическая катушка – магнит» на прямолинейных стержневых конструкциях, динамические характеристики которых легко определяются аналитическим путем. В дальнейших исследованиях погрешностная кривая в регистрируемых характеристиках исследуемых объектов учитывается автоматически с помощью разработанного программного обеспечения.

Во-вторых, датчик-акселерометр, регистрирующий реакцию на возмущение в районе икроножной мышцы, также заменен связкой «электрическая катушка – магнит». В данном случае колебания магнита (10), прикрепленного двусторонним скотчем в месте соединения ахиллова сухожилия с икроножной мышцей, вызывают в катушке датчика (2) электрический ток. Образованный предварительным усилителем сигнал с катушки поступает на вход звуковой карты персонального компьютера для дальнейшего анализа.

В-третьих, система модуляции и обработки сигналов заменена с аналогового оборудования (генератор, осциллограф) на цифровое, представленное персональным компьютером, в целях удобства диагностики и простоты обработки экспериментальных данных и исследования особенностей пациентов, а также учета нелинейности характеристик измерительного оборудования.

Для получения результатов достаточно поместить пациента на кушетку (4), закрепить нижнюю конечность с помощью шины (3) и поворотной площадки (5), установить магниты (9) и (10), расположить под ними с соответствующимзором электрические катушки (1) и (2), задать диапазон сканирования по частоте возбуждения и запустить соответствующий модуль программного обеспечения. Амплитудно-частотные характеристики сухожильно-мышечного комплекса голени пациента отобразятся на экране в режиме реального времени.

После модернизации стенда диагностика повреждения ахиллова сухожилия выглядит следующим образом (рис. 1). Программное обеспечение генерирует синусоидальный сигнал, выходящий в аналоговом виде со звуковой карты персонального компьютера. В усилителе происходит обработка сигнала по мощности до уровня, необходимого для создания в электрической катушке-возбудителе ЭДС, соответствующего минимальной амплитуде воздействия на сухожилие. Отклик, регистрируемый с помощью магнита и катушки датчика, в виде напряжения полезного сигнала обрабатывается предварительным усилителем и подается на линейный вход звуковой карты персонального компьютера. Полученный сигнал отображается в виде зависимости амплитуды от частоты и является готовым

для дальнейшего анализа. Следует отметить, что регистрируемая динамическая характеристика объекта учитывает различные нелинейности средств исследования. Для устранения электрической наводки катушки возбудителя на катушку датчика проводится компенсирующее обратное сканирование по частоте без объекта исследования.

Интеграция средств и устройств исследования осуществлена в разработанном программном обеспечении, написанном на языке программирования Delphi 6.0, что позволяет производить исследования на персональных ЭВМ с тактовой частотой процессора не менее 200 MHz, оснащенных звуковой картой, в операционной системе Microsoft Windows 98/2000/XP. Использование звуковой карты компьютера вместо дорогостоящего программируемого контроллера позволяет значительно уменьшить стоимость устройств исследования. Программное обеспечение выполнено в виде нескольких модулей, выполняющих следующие задачи:

- задание нижнего и верхнего пределов сканирования по частоте;
- выставление шага сканирования по частоте и времени задержки на каждом шаге;
- генерацию цифрового синусоидального сигнала и контроль его прохождения и трансформации в аналоговый сигнал, поступающий на выход звуковой карты;
- съем сигнала с входа звуковой карты и приведение его к виду, необходимому для отображения и последующего анализа;
- учет нелинейных характеристик устройств исследования, а также погрешностей измерения;
- отображение амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) исследуемого объекта.

Задание пределов сканирования, шага, времени задержки и других параметров осуществляется в рабочем окне программы с клавиатуры. Исследуемая характеристика выведена в виде зависимости амплитуды, получаемой в момент, когда колебания исследуемого объекта считаются установившимися, от частоты в данный момент времени. Координаты графика автоматически пересчитываются и перерисовываются при получении новых значений, что обеспечивает наблюдение АЧХ в режиме реального времени.

Для связи со звуковой картой применяется встроенный программный модуль Delphi 6.0 MMSystem. Форма входного и выходного сигнала отображается под окном результатов. Это необходимо для оперативного наблюдения за уровнем сигнала. Звуковая карта имеет нелинейную электрическую характеристику, обусловленную наличием множества электронных компонент: тракта передачи, тракта приема, тракта усиления. Подобная особенность звуковых карт выражается в низкой способности к прохождению и усилению сигнала на частотах в пределах от 0 до 4 Гц. Для более высоких частот электрическая характеристика принимает экспоненциальную зависимость и для частот от 40 Гц и выше становится линейной. Аналогично ведут себя по отношению к низким частотам усилители. Данное поведение электронных устройств отражено в части программы, ответственной за генерацию синусоидального сигнала для его коррекции на низких частотах.

К программному обеспечению относится также модуль, предназначенный для просмотра и анализа накопленных результатов. Модуль реализован при помощи стандартных графических средств, позволяет вести обработку данных, выявлять резонан-

сы исследуемой механической системы и сравнивать между собой динамические характеристики, полученные в разное время для различных объектов. Программа способна работать одновременно с десятью графиками и выявлять до семи резонансов для каждого графика с помощью средств изменения масштаба отображения резонансной кривой. Предусмотрена возможность вывода графической информации на принтер, учета изменений в каждом соответствующем файле, а также сохранения полученных данных в текстовом файле. Структура данных в файле сформирована достаточно удобным образом как для последующего изучения в специальной программе просмотра, так и для обработки результатов в специализированных математических программах. Текстовый файл содержит параметр, задающий общее количество точек, и таблицу, содержащую два столбца, в которых указана частота и относительное значение амплитуды для каждого шага.

Тестовые испытания вибрационного стенда. Результаты и их обсуждение. Для проверки работоспособности разработанного устройства, подтверждения обоснованности применяемого метода и достоверности получаемых результатов была выполнена серия тестовых вибрационных экспериментов.

В качестве объекта исследования был выбран стальной стержень, длиной 1 м прямоугольного сечения, шириной 48 мм и высотой 7 мм. Стержень горизонтально установлен на неподвижных опорах таким образом, что его краевые сечения могут совершать повороты в вертикальной плоскости. Таким образом, с достаточно высокой точностью может быть принята модель шарнирно-опертой балки. Возбуждение колебаний стержня производилось на расстоянии 0,15 м от левой опоры. Точка регистрации колебаний была выбрана на расстоянии 0,2 м от правой опоры.

Для обеспечения точности и повышения наглядности АЧХ сканирование по частоте проводилось в диапазоне от 5 Гц до 100 Гц с шагом 1 Гц и временем задержки на каждом шаге 5 с. Величина времени

задержки на шаге была выбрана достаточно большой ввиду высокой добротности колебательной системы и, соответственно, длительного времени перехода системы в режим установившихся колебаний. Таким образом, на каждый эксперимент по регистрации АЧХ шарнирно-опертого стержня было затрачено приблизительно 8 мин.

На рис. 2 представлена амплитудно-частотная характеристика, соответствующая ненагруженной балке. На графике видно, что в исследуемый частотный диапазон попали две резонансные частоты колебаний стержня: 15,0 Гц и 56,0 Гц. Им соответствуют первая симметричная и вторая асимметричная формы колебаний стержня. АЧХ колебаний стержня имеет ярко выраженные острые резонансные пики, что свидетельствует о низкой диссипации энергии и высокой добротности колебательной системы.

Введенная модель шарнирно-опертого стержня позволяет оценить собственные частоты колебаний системы. Согласно известной формуле [10], собственные частоты могут быть вычислены следующим образом:

$$\rho_k = k^2 \pi^2 \sqrt{\frac{EJ}{\rho S l^4}},$$

где l – длина стержня; J и S – момент инерции и площадь поперечного сечения стержня; E и ρ – модуль упругости и плотность материала стержня.

Для стального стержня были приняты следующие значения материальных констант: $E = 1,8 \cdot 10^{11}$ Па, $\rho = 7950$ кг/м³. В результате получаем значения первых двух собственных частот колебаний шарнирно-опертого стержня: 15,1 Гц и 60,4 Гц. Отличие экспериментальных резонансных частот от собственных частот колебаний стержня составляет 0,66 % и 7,28 %, соответственно.

Дополнительно было исследовано влияние сосредоточенной нагрузки, приложенной в середине балки в диапазоне от 0,5 кг до 1,5 кг. При постепенном увеличении нагрузки наблюдалось плавное сме-

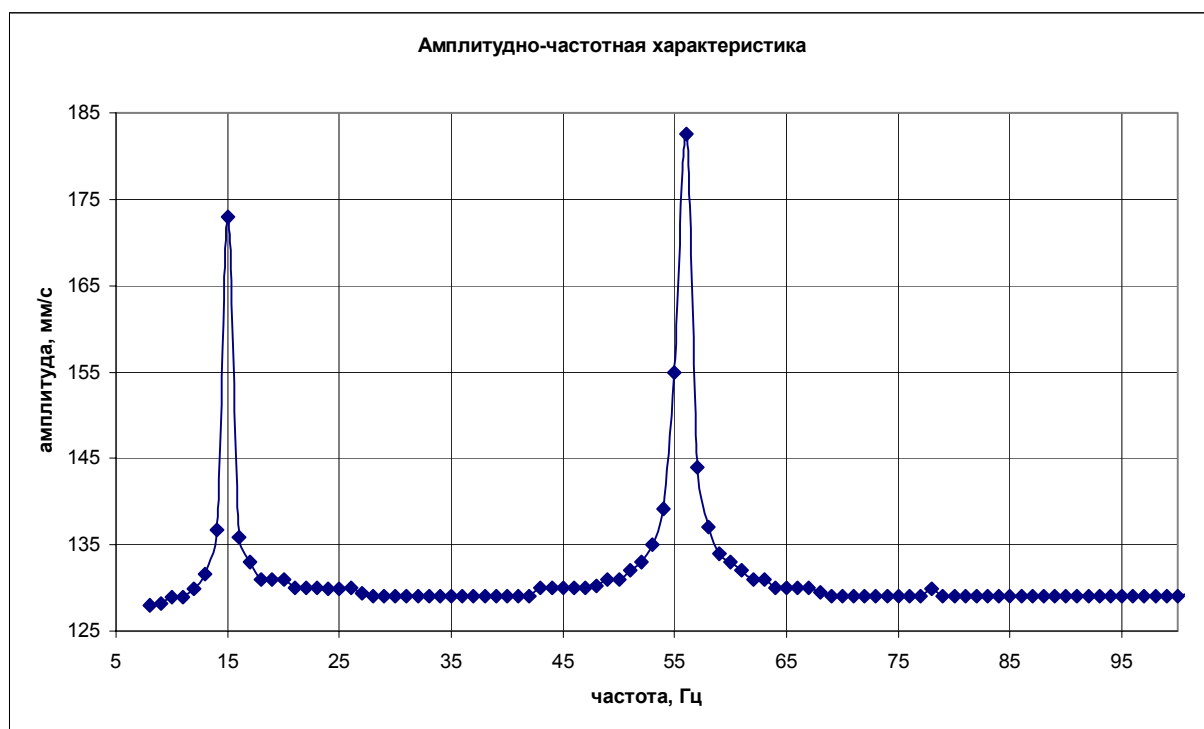


Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика тестируемой стальной балки

щение первого резонансного пика в область низких частот, в то время как значение второй резонансной частоты оставалось практически неизменным. Данное поведение качественно соответствует теоретической закономерности влияния инерционных свойств системы на ее собственные частоты: увеличение массы системы приводит к уменьшению частот. Однако в случае асимметричной формы колебаний стержня средняя точка, где приложена сосредоточенная нагрузка, является неподвижным узлом, что приводит к существенному снижению влияния дополнительной подвешенной массы на собственные частоты колебаний стержня.

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что предложенный способ исследования резонансных свойств объектов может применяться для диагностики физиологического состояния мышечно-сухожильного комплекса голени в области низких частот и первых форм колебаний. Имеющее место отличие экспериментальных значений от аналитических на более высоких частотах требует дополнительного исследования.

Исследование АЧХ мягких тканей голени.

Исследования резонансных свойств мягких тканей голени на примере ахиллова сухожилия совместно с камбаловидной и икроножной мышцами были проведены на выборке здоровых добровольцев, не имеющих медицинских противопоказаний к проведению вибрационного воздействия (мужчин в возрасте 20 лет со сходными анатомическими характеристиками), в период с 15.09.2004 по 15.12.2004. Возбуждение осуществлялось в районе голеностопного сустава посредством электромагнитного комплекса, образованного катушкой возбуждения и постоянным магнитом. Регистрация вынужденных колебаний в установленном режиме производилась в месте вставания ахиллова сухожилия в икроножную мышцу. Частота автоматически изменялась в диапазоне от 4 Гц до 60 Гц с шагом 1 Гц и временем задержки 2 с. Ранее было обнаружено, что вибрационное возбуждение может существенно влиять на кровоток в мягких тканях и

приводить к изменению вязко-упругих характеристик тканей [11]. Поэтому общее время проведения эксперимента необходимо было свести к минимально возможному, чтобы уменьшить влияние механического воздействия на характеристики кровотока в мышцах голени.

На рис. 3 представлены результаты двух испытаний – амплитудно-частотные характеристики мышечно-сухожильного комплекса голени в области низких частот. Обе резонансные кривые соответствуют колебаниям тканей голени одного испытуемого и получены с разностью между экспериментами в 30 с.

На графике видно, что в исследуемый частотный диапазон попали четыре основные резонансные частоты колебаний мягких тканей стержня: 12 Гц, 18 Гц, 31–34 Гц и 51–52 Гц. Основное влияние на формы колебаний мышечно-сухожильного комплекса голени оказывает движение ахиллова сухожилия в соответствии с математической моделью консолюно закрепленного стержня на упругом основании. Кроме основных форм колебаний ахиллова сухожилия имеют место колебания мышечных структур, имеющих более сложную пространственную форму движения. Резонансные пики на амплитудно-частотных характеристиках достаточно гладкие, что свидетельствует о значительной диссипации энергии в мягких тканях.

Интересно отметить, что повторное исследование АЧХ голени того же добровольца подтверждает гипотезу о пролонгированном влиянии вибрационного воздействия на вязко-упругие свойства мышечных тканей. В самом деле, резонансные частоты третьего и четвертого колебательных контуров при втором сканировании смещаются влево, что может свидетельствовать о временном уменьшении модуля упругости мышц, подверженных первичной вибрации. Кроме того, добротность парциальных колебательных контуров также изменяется. Первый резонансный пик практически полностью пропадает, добротность второго колебательного контура снижается с 2,63 до 2,31, добротность третьего колебательного контура снижается с 5,86 до 2,38. Это свидетельст-

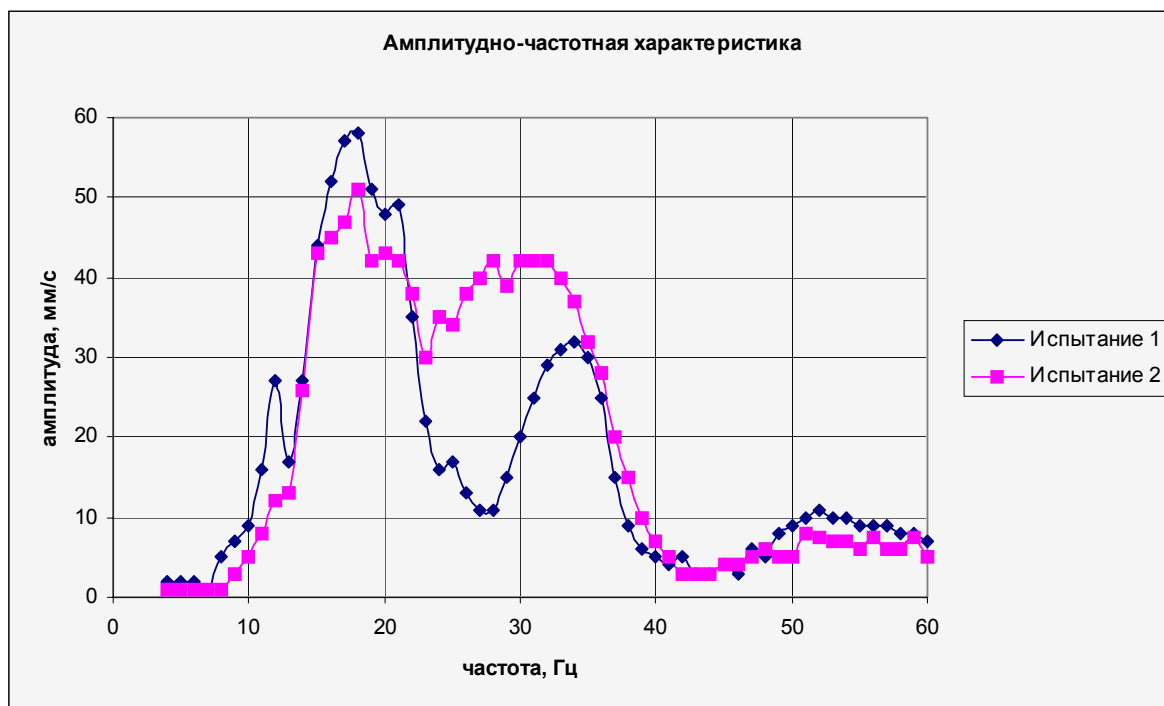


Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики мышечно-сухожильного комплекса голени

ует об усилении диссипативных процессов в мягких тканях. Возможным физиологическим объяснением данного эффекта может служить гипотеза об усилении кровотока в мышцах под действием вибрационно-го воздействия. В свою очередь, возрастание объема содержания жидкости в порах может приводить к усилению диссипативных процессов в тканях, что выражается в снижении добротности колебательных контуров и в сглаживании резонансных кривых. Теоретической моделью мягких тканей для дальнейших исследований рассмотренного явления может служить модель поропрутого тела, образованного упругим каркасом и насыщенного жидкостью.

Заключение

В результате проведенных исследований был разработан способ и устройство регистрации амплитудно-частотных характеристик мягких тканей голени, в частности АЧХ мышечно-сухожильного комплекса, образованного камбаловидной и икроножной мышцами совместно с ахилловым сухожилием. Основные преимущества разработанного метода по сравнению с предложенным ранее электродинамическим вибрационным стендом следующие:

- более высокое качество определения повреждения за счет применения автоматического способа диагностики и регулярно увеличивающейся базы объектов исследования;

- меньшая стоимость стенда за счет использования аналоговых устройств ввода и вывода на базе звуковой карты персонального компьютера;

- минимальное воздействие устройств исследования на объект за счет уменьшения площади поверхности, задействованной в диагностике, и количества точек соприкосновения средств и объекта исследования;

- использование простого в понимании и удобного в эксплуатации программного обеспечения, объединяющего устройства исследования и оперативного учитывающего различные погрешности измерения;

- возможность гибкого изменения амплитуды воздействия на объект исследования (применение автоматического регулирования) с целью достижения безболезненности исследования.

В перспективе имеется возможность применения стенда, при условии его дополнительной модернизации, для послеоперационной реабилитации голеностопного сустава и мышечно-сухожильного комплекса с травмой ахиллова сухожилия. Может быть предложен

вариант локального вибрационного воздействия на сухожилие или мышечные ткани практически без изменения конструкции стенда, что, однако, ограничивает сферу применения метода только травмами ахиллова сухожилия. В более сложном варианте может быть предложено вибрационное воздействие на стопу и голеностопный сустав как на единый комплекс, что требует значительного изменения конструкции стенда, но может использоваться при различных травмах голеностопного сустава, включая повреждения твердых и мягких тканей голени.

Список литературы

1. Christensen A.B., Ammitzbohl F., Dyrbye C. Assessment of tibial stiffness by vibration testing in situ – I. Identification of mode shapes in different supporting conditions // J. Biomech. – 1986. – № 19(1). – P. 53–60.

2. Cornelissen M., Cornelissen P., Van der Perre G. Assessment of tibial stiffness by vibration testing in situ – III. Sensitivity of different modes and interpretation of vibration measurements // J. Biomech. – 1987. – № 20(4). – P. 333–342.

3. Адамович И.С., Диевбернс У.К. Некоторые задачи динамики большеберцовой кости человека // Совр. пробл. биомеханики. – 1989. – № 6. – С. 99–111.

4. Анишкина Н.М., Антонев В.А., Ефимов А.П. Акселерометрическая вибрационная диагностика функционального состояния опорно-двигательного аппарата человека // Вибрационная техника: Материалы семинара. – М.: МДНТП, 1986. – С. 79–83.

5. Roberts S.G., Steele C.R. Efficacy of monitoring long-bone fracture healing by measurement of either bone stiffness or resonant frequency: numerical simulation // J. Orthop. Res. – 2000. – № 18(5). – P. 691–697.

6. Georgiou A.P., Cunningham J.L. Accurate diagnosis of hip prosthesis loosening using a vibrational technique // Clin. Biomech. – 2001. – №16(4). – P. 315–323.

7. Патент РФ № 2077266. Стенд для вибродиагностики ахиллова сухожилия / И.В. Малышев, М.А. Ноздрин, В.И. Шапин, В.Л. Щавелев. – 1997, Бюл. №11.

8. Патент РФ № 2123803. Устройство для диагностики состояния трехглавой мышцы голени / С.Е. Львов, В.И. Шапин, В.Л. Щавелев, С.В. Вихрев. – 1998, Бюл. №36.

9. Maslov L.B., Shapin V.I. Vibromechanical diagnostic criteria for the achilles tendon acute tears // Russian J. Biomechanics. – 2000. – № 4(1). – P. 62–70.

10. Тимошенко С.П., Янг Д.Х., Уивер У. Колебания в инженерном деле / Пер. с англ. Л.Г. Корнейчука. – М.: Машиностроение, 1985. – 472 с.

11. Микроциркуляция и кислородные режимы скелетных мышц после кратковременного вибровоздействия / В.И. Ермилов, С.Е. Львов, С.В. Русских, И.Г. Колодина // Физика и радиотехника в медицине и биотехнологии: Материалы Респ. науч.-техн. конф. – Владимир: Владим. гос. техн. ун-т, 1996. – С. 125–128.

Шапин Вадим Иванович,

ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, профессор, зав. кафедрой теоретической и прикладной механики,
телефон (4932) 26-97-11,
e-mail: tipm@tipm.ispu.ru

Маслов Леонид Борисович,

ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и прикладной механики,
телефон (4932) 26-97-11,
e-mail: tipm@tipm.ispu.ru

Сабанеев Николай Андреевич,

ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»
Инженер кафедры теоретической и прикладной механики
телефон (4932) 26-97-11,
e-mail: tipm@tipm.ispu.ru

Смирнов Дмитрий Сергеевич,
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
аспирант кафедры теоретической и прикладной механики,
телефон (4932) 26-97-11,
e-mail: tipm@tipm.ispu.ru