

11. *Auricchio F. et al.* Fatigue of 316L stainless steel notched  $\mu$ m-size components // *Int. J. Fatigue*. 2014. Vol. 68. PP. 231-247.
12. *Hall E.J.* Guyton and hall textbook of medical physiology / 13th edition. – Elsevier, 2011.
13. *Schmidt T. et al.* Coronary Stents: History, Design, and Construction // *J. Clin. Med*. 2018. Vol. 7. № 6. P. 126.

*Кирилл Юрьевич Клышников,*  
научный сотрудник,  
*Евгений Андреевич Овчаренко,*  
канд. техн. наук, зав. лабораторией,  
лаборатория новых биоматериалов,  
ФГБНУ «Научно-исследовательский  
институт комплексных проблем  
сердечно-сосудистых заболеваний»,  
г. Кемерово,

*Дмитрий Владимирович Нуштаев,*  
инженер,  
ЗАО «Северсталь Менеджмент»,  
г. Москва,  
*Леонид Семенович Барбараи,*  
гл. научный сотрудник,  
ФГБНУ «Научно-исследовательский  
институт комплексных проблем  
сердечно-сосудистых заболеваний»,  
г. Кемерово,  
e-mail: KlyshnikovK@gmail.com

*Л.М. Смирнова, К.М. Макаров, Е.А. Скребенков, М.И. Монахова*

## **Web-приложение для персонализированного синтеза модульного протеза нижних конечностей**

### **Аннотация**

Обсуждается проблема многокритериального выбора комплектующих протеза нижней конечности. Представлены данные о создании программного обеспечения для формирования глобальной электронной базы данных с информацией о моделях протезных модулей, учитываемых при комплектации протеза инвалиду. Использование такой базы предполагается специалистами на распределенных географически удаленных рабочих местах. Успешность решения этой проблемы влияет на персонализацию протезирования и качество медицинской реабилитации инвалидов.

### **Введение**

Выбор моделей протезных модулей при синтезе протеза должен учитывать их соответствие назначению протеза, анатомо-функциональным особенностям, двигательной активности, условиям жизнедеятельности и профессиональной трудовой деятельности, среде проживания, социально-бытовому статусу и другим обоснованным требованиям пациента. При этом поддержка многокритериального принятия решения может быть организована на основе метода, работающего в условиях неопределенности, например метода анализа иерархий [1].

Специалисты протезно-ортопедических предприятий выбирают комплектующие модульного протеза, используя информационно-рекламные каталоги с номенклатурой, шифрами, характеристиками их моделей, включая планируемый режим использования протеза (для повседневного применения, занятий адаптивными видами спорта и т. д.), уровень двигательной активности инвалида, массу тела, возрастную группу, размер обуви, эстетические характеристики модели. Особое значение из этих факторов имеет уровень двигательной активности. У некоторых крупных мировых производителей есть принятые доказательные классификационные системы показателей этого фактора, например система «MOBIS» компании «Ottobock SE & Co. KGaA» (Германия) [2]. Известен также международный инструмент для определения мобильных функций пациента – предиктор мобильности, базирующийся на выполнении и оценке двигательных тестов на протезе и без него [3], [4].

Однако в каталогах представлена номенклатура протезных модулей лишь собственной продукции, причем в объеме и форме, отличающихся для разных производителей. Например, в одних каталогах указаны конструктивные показатели, но не отражены многие из функциональных, в других – наоборот. Некоторые из каталогов не лишены рекламного оттенка, не полностью раскрывают информацию о функциональности изделия, его конструктивных и эксплуатационных характеристиках.

В результате этих проблем протезист при комплектации протеза часто ограничивается только собственным предыдущим опытом работы, что нередко приводит к ошибке: в одном случае назначаются модели с функциональными и техническими характеристиками, недостаточно высокими для уровня анатомо-функционального состояния протезируемого пациента; в другом случае – высокотехнологичные (дорогие) узлы протеза, потенциальные возможности которых, заложенные в конструкцию, пациент не способен или не стремится в полной мере реализовать. В первом случае ошибка приводит к снижению потенциально возможного уровня двигательной активности пациента на протезе и ограничению таким образом прав инвалида, во втором – к необоснованным финансовым затратам на протезирование.

Решению проблемы могла бы способствовать технология персонализированного синтеза протеза с поддержкой принятия решения при многокритериальном выборе моделей модулей протеза из глобальной базы данных (БД), охватывающей продукцию разных производителей с отражением их характеристик в унифицированной системе признаков.

На этапе начала работы мы не смогли найти аналога подобной технологии, и лишь в процессе ее разработки нам удалось выявить зарубежный источник с описанием аналогичного подхода к проектированию протеза [5]. Нам представилось целесообразным поделиться собственным опытом решения задач, относящихся к разработке подобной технологии, таких как обоснование структуры классификации характеристик модулей протезов нижних конечностей, которая должна лежать в основе глобальной БД протезных модулей, создание программного обеспечения для формирования и сопровождения такой БД.

### **Цель работы**

Целью работы является обоснование структуры классификации характеристик моделей модулей протезов нижних конечностей для персонализированной комплектации протеза инвалиду, создание программного обеспечения для формиро-

вания и сопровождения глобальной электронной базы данных с информацией о моделях протезных модулей.

## Материалы и методы

Для систематизации характеристик моделей протезных модулей, учитываемых при синтезе протеза, в работе использован иерархический метод классификации. Предложена классификация глубиной в пять ступеней: первая ступень – множество типов  $A = \{a_i\}$  протезных модулей; вторая – множество типов свойств  $B = \{b_j\}$  модулей; третья – множество характеристик  $C = \{c_k\}$ , отражающих свойства модулей; четвертая –

множество признаков  $D = \{d_l\}$ , являющихся мерой оценки характеристик, отражающих свойства модулей; пятая – нижняя ступень классификации – множество подпризнаков  $E = \{e_q\}$ , уточняющих оценки признаков (для некоторых признаков подпризнаки могут не использоваться) (табл. 1).

Разработанная классификация легла в основу структуры глобальной электронной БД моделей протезных модулей.

Для формирования и сопровождения этой БД она была создана в виде веб-приложения. В качестве основного инструмента разработки приложения принят веб-фреймворк Django (v3.0) для языка программирования Python (v3.8).

Таблица 1

Структура классификации характеристик моделей модулей протезов нижних конечностей

| Ступень | Наименование ступени                                                                                                                                                       | Содержание ступени                                                                                                                                                                                                                  |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1       | Множество $A$ типов модулей, к которым относятся модели протезной продукции                                                                                                | $A = \{a_i\}, i = 1, 2, \dots, n; n$ – количество типов модулей протезов нижних конечностей: стопа, голеностоп, коленный узел, тазобедренный узел и т. д.                                                                           |
| 2       | Множество $B$ типов свойств модулей (в классификации каждому типу модулей $a_i$ соответствует один тот же набор типов свойств для выбора модели модуля при протезировании) | $B = \{b_j\}, j = 1, 2, \dots, 6$ (1 – конструкционные; 2 – эстетические; 3 – функциональные; 4 – эксплуатационные; 5 – ограничительные по основным параметрам состояния структур и функций организма пациента; 6 – дополнительные) |
| 3       | Множество $C$ характеристик $\{c_k\}$ , отражающих свойства $\{b_j\}$ модулей $\{a_i\}$                                                                                    | $C = \{c_k\}, k = 1, 2, \dots, m; m$ – количество характеристик для описания всего множества свойств $B$                                                                                                                            |
| 4       | Множество $D$ признаков $\{c_k\}$ для описания характеристик $\{c_k\}$ , отражающих свойства $\{b_j\}$ модулей $\{a_i\}$                                                   | $D = \{d_l\}, l = 1, 2, \dots, p; p$ – количество признаков для описания всего множества характеристик $C$ . Для описания любого $c_k$ используется количество признаков $r_{ck} \geq 1$                                            |
| 5       | Множество подпризнаков $E$ для уточнения признаков $\{d_l\}$                                                                                                               | $E = \{e_q\}, q = 1, 2, \dots, r; r$ – количество подпризнаков для описания множества признаков $D$ . Для некоторых $d_l$ подпризнаки могут не использоваться ( $r_{eq} = 0$ )                                                      |

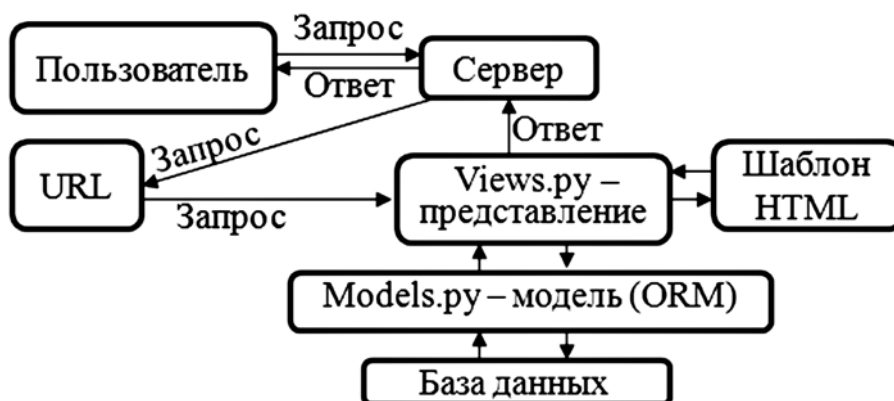


Рис. 1. Архитектура Django

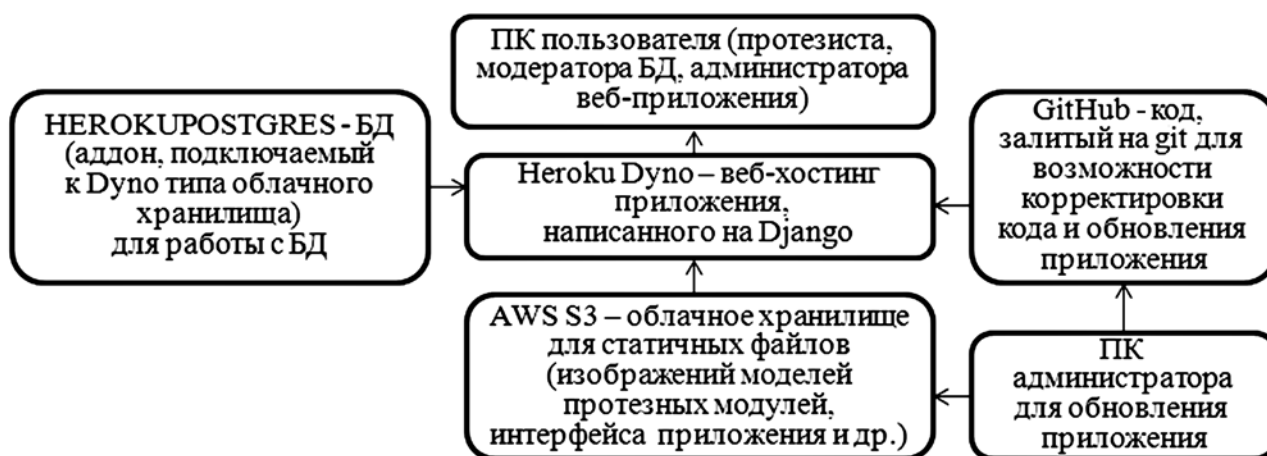


Рис. 2. Архитектура веб-приложения

Характеристики моделей модулей искусственных стоп

| Тип<br>$B = \{b_j\}$                                                      | Признаки                                                   |                                                                                       |                                                                      |
|---------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
|                                                                           | $C = \{c_k\}$                                              | $D = \{d_i\}, E = \{e_q\}$                                                            |                                                                      |
| $b_1$ –<br>конструкционные                                                | Тип конструкции                                            | Без шарнира                                                                           |                                                                      |
|                                                                           |                                                            | С шарниром (1-осным / 2-осным / сферическим)                                          |                                                                      |
|                                                                           |                                                            | С псевдошарниром                                                                      |                                                                      |
|                                                                           | Профиль стопы                                              | Обычный / сниженный                                                                   |                                                                      |
|                                                                           |                                                            | Деревянный                                                                            |                                                                      |
|                                                                           |                                                            | Пластмассовый                                                                         | S-образный, C-образный                                               |
|                                                                           | Форма и материал несущего элемента                         | Из композита                                                                          |                                                                      |
|                                                                           |                                                            | Нет                                                                                   |                                                                      |
|                                                                           |                                                            | С внутренним источником энергии / с внешним                                           |                                                                      |
| $b_2$ –<br>эстетические                                                   | Масса модуля                                               | Перечень диапазонов значений                                                          |                                                                      |
|                                                                           | Форма                                                      | Антропоморфная / техноформа                                                           |                                                                      |
|                                                                           | Рельеф                                                     | Без контура пальцев / с отформованными пальцами / с разделенным большим пальцем       |                                                                      |
|                                                                           | Цвет                                                       | Белый/телесный/желтый/коричневый/иной                                                 |                                                                      |
| $b_3$ –<br>функциональные                                                 | Дорси- и плантофлексия                                     | Функция имеется / функция отсутствует                                                 |                                                                      |
|                                                                           | Инверсия и эверсия                                         | Функция имеется / функция отсутствует                                                 |                                                                      |
|                                                                           | Аверсия и инверсия                                         | Функция имеется / функция отсутствует                                                 |                                                                      |
|                                                                           | Демпфирование толчка в перекате через стопу                | Переднего                                                                             | есть / нет                                                           |
|                                                                           |                                                            | Заднего                                                                               | есть / нет                                                           |
|                                                                           | Упругость задн. толчка                                     | Слабая / нормальная / повышена / регулируемая                                         |                                                                      |
|                                                                           | Рекуперация энергии                                        | Невозможна / слабая / нормальная / повышена                                           |                                                                      |
|                                                                           | Регулировка подвижности стопы                              | Невозможна / сагиттальная / фронтальная / сагиттальная и фронтальная                  |                                                                      |
|                                                                           | Регулирование под высоту каблука                           | Невозможно / установкой дополнительных элементов / переключателем                     |                                                                      |
| $b_4$ –<br>эксплуатационные                                               | Сцепляемость с опорой                                      | Нормальная / повышенная                                                               |                                                                      |
|                                                                           | Грязеустойчивость                                          | Сниженная / нормальная / повышенная                                                   |                                                                      |
|                                                                           | Износостойкость                                            | Сниженная / нормальная / повышенная                                                   |                                                                      |
|                                                                           | Водостойкость                                              | Сниженная / нормальная / повышенная                                                   |                                                                      |
|                                                                           | Энергозависимость                                          | От аккумулятора / независима                                                          |                                                                      |
|                                                                           | Гарантийный срок                                           | В годах                                                                               |                                                                      |
| $b_5$ –<br>ограничения<br>по состоянию<br>структур и функций<br>организма | Ремонтопригодность                                         | Отсутствует / сниженная / повышенная                                                  |                                                                      |
|                                                                           | Возраст                                                    | Диапазон возрастных групп                                                             |                                                                      |
|                                                                           | Пол                                                        | Женский / мужской / не имеет значения                                                 |                                                                      |
|                                                                           | Двигательн. активность                                     | Нулевая / низкая / сниженная / средняя / высокая                                      |                                                                      |
|                                                                           | Уровень ампутации                                          | Через голеностопный сустав (ГСС) / выше ГСС                                           |                                                                      |
|                                                                           | Предельная масса тела                                      | В килограммах                                                                         |                                                                      |
|                                                                           | Размер стопы                                               | В принятой системе размеров обуви                                                     |                                                                      |
|                                                                           | Требования к обучению                                      | Обычные / повышенные                                                                  |                                                                      |
|                                                                           | Тип протезирования                                         | Первичное / повторное                                                                 |                                                                      |
|                                                                           | Целевое назначение протеза                                 | Повседневное использование / для купания / для адаптивно-физической культуры и спорта |                                                                      |
|                                                                           | Предпочтительные локомоторные режимы использования протеза | Стояние                                                                               |                                                                      |
|                                                                           |                                                            | Ходьба                                                                                | по ровной поверхности / неровной поверхности / скользкой поверхности |
|                                                                           |                                                            | Подъем и спуск                                                                        | по наклонной поверхности / по лестничному маршу                      |
| $b_6$ –<br>дополнительные                                                 | Производство                                               | Отечественное / зарубежное / совместное                                               |                                                                      |
|                                                                           | Поставщик                                                  | Производитель / официальный представитель производителя в стране / дистрибьютор       |                                                                      |
|                                                                           | Ценовая категория                                          | Перечень диапазонов цен                                                               |                                                                      |



– облачной PaaS-платформе, поддерживающей ряд языков программирования.

## Заключение

Разработанная классификация характеристик модулей протезов нижних конечностей, положенная в основу структуры глобальной БД с информацией об этой продукции, и веб-приложение, созданное для формирования и сопровождения такой БД, являются первым шагом в направлении технологии персонализированного многокритериального выбора комплектующих модульного протеза нижней конечности. Внедрение этих результатов в практику протезирования должно облегчить протезисту и пациенту получение информации о номенклатуре протезной продукции разных производителей, повысить рациональность назначения комплектующих протеза с учетом структурных нарушений и функциональных возможностей организма пациента и его личных потребностей, поднять уровень качества реабилитации инвалида.

Использование такой БД при комплектации изготавливаемого протеза предполагается различными пользователями на распределенных географически удаленных рабочих местах, зарегистрировавшимися на площадке и получившими права доступа к работе с веб-приложением.

## Список литературы:

1. *Smirnova L.M., Monakhova M.I., Yuldashev Z.M., Daminova E.A.* Hardware and Software Complex for the Synthesis of Lower Limb Prostheses Using Unified Components / 2018 Third International Conference on Human Factors in Complex Technical Systems and Environments (ERGO) and Environments (ERGO). Saint Petersburg, Russia, 2018. PP. 185-188.
2. MOBIS The Ottobock mobility system [электронный ресурс] / <https://shop.ottobock.us/media/pdf/646A179-GB-04-1403w.pdf> (дата обращения: 03.01.2021).
3. *Gailey R.S., Roach K.E., Applegate E.B. et al.* The amputee mobility predictor: An instrument to assess determinants of the lower-limb amputee's ability to ambulate // Arch. Phys. Med. Rehabil. 2002. Vol. 83 (5). PP. 613-627.
4. *Gailey R.S., Gaunaud I.A., Raya M.A. et al.* Development and reliability testing of the Comprehensive High-Level Activity Mobility Predictor (CHAMP) in male servicemembers with traumatic lower-limb loss // Journal of Rehabilitation Research and Development. 2013. Vol. 50 (7). PP. 905-918.

5. *Colombo G., Gabbiadini S., Regazzoni D., Rizzi C.* Design procedure and rules to configure lower limb prosthesis / Proceedings of the ASME 2011 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference. IDETC/CIE 2011. August 28-31, 2011. Washington, DC, USA. Paper № DETC2011-47651. PP. 673-681.
6. *Forcier J., Bissex P., Chun W.J.* Python web development with Django. – Crawfordsville, Indiana. USA: Pearson Education, Inc., 2008. 375 p.
7. *Holovaty A., Kaplan J.* The definitive guide to Django: Web development done right. – Moss. – New York. USA: Apress, 2009. 499 p.

Людмила Михайловна Смирнова,  
д-р техн. наук, ведущ. научный сотрудник,  
отдел биомеханических исследований  
опорно-двигательной системы,  
ФГБУ «Федеральный научный центр  
реабилитации инвалидов им. Г.А. Альбрехта»  
Минтруда России,  
профессор,  
кафедра биотехнических систем,  
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский  
государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина)»,  
Константин Михайлович Макаров,  
мл. научный сотрудник,  
Евгений Александрович Скребенков,  
отдел биомеханических исследований  
опорно-двигательной системы,  
ФГБУ «Федеральный научный центр  
реабилитации инвалидов им. Г.А. Альбрехта»  
Минтруда России,  
г. С.-Петербург,  
Марина Игоревна Монахова,  
зам. коммерческого директора,  
ФГУП «ЦИТО»,  
г. Москва,  
e-mail: [info@diaserv.ru](mailto:info@diaserv.ru)

А.В. Агапов, Г.В. Мицын

## Методика динамического облучения для протонной радиотерапии

### Аннотация

В Медико-техническом комплексе Объединенного института ядерных исследований (г. Дубна) разработана новая методика динамического облучения глубоко расположенных мишеней сложной формы с использованием замедлителя переменной толщины и многосекторного коллиматора. Устройства были сконструированы с учетом особенностей существующей системы формирования радиотерапевтического протонного пучка в комплексе. Предварительные результаты дозиметрической проверки показали лучшую степень конформности сформированных дозовых полей по сравнению со стандартной пассивной методикой трехмерной конформной терапии.

### Введение

Главным принципом при проведении любой процедуры лучевого лечения является соблюдение предельной степени конформности облучения. Под конформностью понимается максимально возможное соответствие сформированного гомогенного дозового поля с предписанным объемом мишени облучения. Другими словами, метод должен обеспечить подведение максимальной дозы к опухоли и при этом минимизировать облучение здоровых прилегающих тканей.

В Медико-техническом комплексе (МТК) Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований на базе ускорителя фазотрона применяется высокоточная пассивная методика трехмерной конформной протонной радиотерапии [1]. Основными элементами установки для реализации этой методики являются: гребенчатый фильтр – модификатор протонного пучка, позволяющий расширять по глубине пик Брэгга в соответствии с продольным размером мишени; индивидуальный фигурный коллиматор, предназначенный для формирования поперечного профиля протонного