

Научная статья

DOI: 10.15593/2224-9397/2024.1.08

УДК 621.313.13-181.48

А.П. Плюснин, Б.В. Кавалеров

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Российская Федерация

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ В БИОНИЧЕСКОМ ПРОТЕЗИРОВАНИИ

В последние годы бионические протезы получают всё большее распространение. Так, объем рынка бионических протезов в 2021 году составлял 6,4 миллиарда долларов с тенденцией к дальнейшему увеличению. Это объясняется как общим развитием робототехники и медицины, так и правительственными программами, направленными на помощь пострадавшим в получении протеза. **Цель работы:** оценить актуальность проблемы разработки специализированных электрических двигателей для применения в бионическом протезировании и предложить возможные варианты решения. **Методы:** в статье оценена потребность в протезировании на территории России, приведены данные по количеству инвалидов, предоставленные Росстатом. Для определения текущего состояния в области массового производства рассматриваются протезы, выпускающиеся серийно. Рассмотрены протезы фирм *Össur Myoelectric* (протезы *i-limb u i-digit*), *RSL Steeper* (в данный момент выкуплены *Ottobock*) (протезы *bebeionic* и *micelangelo*). Также рассмотрен пример открытого проекта, подобные проекты получили распространение вместе с аддитивными технологиями (*Ada V1.1*, представленный *open bionics lab*). Для уточнения направления текущего развития бионического протезирования рассмотрены статьи последних лет, в которых в основном описываются перспективные методы улучшения систем управления протезом. **Результаты:** в ходе исследования выявлены недостатки использования традиционных электродвигателей для применения в бионических протезах. Предложен путь решения проблемы за счет использования специально разработанных цилиндрических линейных и сферических электродвигателей. Показаны три «точки применения» данных типов двигателей. Разработана компоновка протеза с линейными и сферическими двигателями. Для сравнения предложенных двигателей с традиционными произведен оценочный расчет. **Практическая значимость:** проведенное исследование позволило определить дальнейшие направления исследований в области бионического протезирования с применением специальных электродвигателей. Результаты, представленные в статье, могут найти применение не только при разработке бионических протезов, но и для манипуляторов роботов-андроидов.

Ключевые слова: электрические машины, бионическое протезирование, специальные электрические машины, линейные электродвигатели, сферические электродвигатели.

A.P. Plyusnin, B.V. Kavalеров

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

PROSPECTS FOR THE APPLICATION OF SPECIAL ELECTRIC MOTORS IN BIONIC PROSTHETICS

In recent years, bionic prostheses have become increasingly widespread. Thus, the market size for bionic prostheses in 2021 was \$6.4 billion, with a tendency to further increase. This is explained both by the general development of robotics and medicine, and by government programs aimed at helping victims obtain a prosthesis. **Purpose:** to assess the relevance of the problem of design specialized electric motors for use in bionic prosthetics and to propose possible solutions. **Methods:** the article assesses the need for prosthetics in Russia and provides data on the number of disabled people provided by Rosstat. To determine the current state of mass production, mass-produced prostheses are considered. We reviewed prosthetics from Össur Myoelectric (i-limb and i-digit prostheses), RSL Steeper (currently purchased by Ottobock) (bebeionic and michelangelo prostheses). Also considered is an example of an open project, the likes of which have become widespread along with additive technologies (Ada V1.1, presented by open bionics lab). To clarify the direction of the current development of bionic prosthetics, articles from recent years are reviewed, which mainly consider promising methods for improving prosthesis control systems. **Results:** The study identified the disadvantages of using traditional electric motors for use in bionic prostheses. A way to solve the problem is proposed through the use of specially designed cylindrical linear and spherical electric motors. Three "points of application" for these types of engines are shown. The layout of the prosthesis with linear and spherical motors has been developed. To compare the proposed engines with traditional ones, an evaluation calculation was made. **Practical significance:** the study made it possible to determine further directions of research in the field of bionic prosthetics using special electric motors. The results presented in the article can be used not only for bionic prostheses, but also for manipulators of android robots.

Keywords: electric machines, bionic prosthetics, special electric machines, linear motors, spherical motors.

Введение

В последние годы бионические протезы получают всё большее распространение. Так, объем рынка бионических протезов в 2021 г. составлял 6,4 миллиарда долларов с тенденцией к дальнейшему увеличению. Это объясняется как общим развитием робототехники и медицины, так и правительственными программами, направленными на помощь пострадавшим в получение протеза [1].

Согласно данным федеральной службы государственной статистики, в России на 2023 г. проживают почти 11 миллионов инвалидов, из которых 4,5 миллиона III степени, к которой обычно относят лиц при ампутации руки на уровне предплечья [2].

С учётом приведённых данных можно сделать вывод об актуальности усовершенствования конструкции бионических протезов с целью увеличения их удобства для конечного пользователя и, по воз-

возможности, снижения их стоимости для охвата большего числа пострадавших.

Целью данной работы является рассмотрение текущих промышленных решений, представленных на рынке бионических протезов, перспективных отечественных и зарубежных разработок и предложение на их основе путей решения текущей проблемной ситуации, которая будет подробно рассмотрена далее в этой статье.

2. Промышленные решения

Среди представленных на рынке компаний рассмотрим наиболее крупные. Серия протезов *i-limb* (производитель *Össur Myoelectric*) представлена в виде линейки стандартных размеров бионических протезов кистей, доступны дополнительные варианты с упрочнённой конструкцией (применение титана). Данные кисти являются своеобразным полуфабрикатом, установка и подгонка которых под пациента выполняется на месте квалифицированным специалистом [3].

Помимо серии *i-limb*, полностью замещающей потерянную кисть, у компании присутствует серия *i-digit*, которая применяется при частичной потере кисти. Внешний вид *i-limb* и *i-digit* представлен на рис. 1 [3, 4].



Рис. 1. Внешний вид протеза *i-limb ultra* (а) и *i-digit* (б)

Исходя из предоставленных производителем технических характеристик, номинальное напряжение питания изделий составляет 7,4 В, а максимальный ток – 5 А при емкости стандартных аккумуляторов

1300 мАч (1300 полных циклов сжатия-расжатия по 1,6 с) и 800 мАч (600 полных циклов сжатия-разжатая по 1,6 с) соответственно [5, 6].

Также стоит отметить, что протезы компании *Össur Myoelectric* согласно инструкциям не рассчитаны на работу при отрицательных температурах, что является заметным недостатком в климатических поясах Российской Федерации.

Протезы *bebionic* изначально разработаны *RSL Steeper*, с февраля 2017 г. находятся во владении компании *Ottobock*. Внешний вид протеза представлен на рис. 2 [7].

В отличие от *Össur Myoelectric* компания *Ottobock* не приводит столь подробной информации по своим протезам, ограничившись параметрами усилия при захвате тремя и двумя пальцами (36,6 и 26,5 Н соответственно), так же температурой эксплуатации от -5 до $+45$ °С [8, 9]. Однако в старой технической информации *RSL Steeper* в разделе “*battery options*” фигурируют батареи с ёмкостью от 1300 до 2200 мАч с номинальным напряжением 7,4 В [10].



Рис. 2. Внешний вид протеза *bebionic*

Протез *Michelangelo* является уже собственной разработкой *Ottobock*. Внешний вид представлен на рис. 3 [11].

Развиваемое усилие в нейтральном (естественном) положении пальцев составляет 15 Н, при боковом захвате предмета – 70 Н [12]. Напряжение питания составляет 11,1 В при емкости встроенного аккумулятора в 1150 мАч, а диапазон рабочих температур составляет от -5 до $+45$ °С [13].



Рис. 3. *Michelangelo hand* внешний вид

Помимо промышленных решений стоит также уделить внимание открытым проектам, которые в связи с удешевлением аддитивных технологий производства получают всё большее распространение. Под открытыми проектами подразумеваются разработки, техническая документация по которым находится в открытом доступе и воспользоваться ею может любой человек при условии, что применение не будет коммерческим. *Ada VI.1* от *Open bionics*: в качестве приводов используются линейные актуаторы фирмы *Actuonix PQ-12-30-12-P* или *PQ-12-63-12* [14].

Для *PQ-12-30-12-P* развиваемое усилие при максимальном КПД составляет 8 Н (скорость 20 мм/с, ток питания 180 мА). Напряжение питания 6 или 12 В, повторяемость $\pm 0,1$ мм, максимальный вес – 21 г, рабочие температуры от -10 до 50 °С [15].

3. Решения, предлагаемые в научных статьях

В данный момент основной вектор научных исследований направлен на разработки в области систем управления протезами [17–19], на вопросы обратной связи протеза [20], а также на различные методы дублирования сигналов управления для увеличения точности [21, 22]. Большое внимание уделяется и системам считывания данных с организма пациента [16, 23] и применению нейросетей в управлении протезом [24, 25]. Несколько меньшее внимание уделяется вопросам общей конструкции протезов или отдельных его элементов [26, 27].

Также можно отметить наличие разработок в области кинематических схем [28]. Однако стоит уточнить, что их малое количество обусловлено тем, что данная тема уже достаточно хорошо изучена, так как первые бионические протезы появились ещё в прошлом веке, а тяговые и другие виды протезов известны ещё со времён античности.

При этом крайне малое внимание уделяется вопросу задействованных в проектировании протеза приводов. Большинство разработок ограничиваются выбором из уже имеющихся в свободной продаже вариантов, так как индивидуальная разработка электродвигателей только увеличит и так значительную стоимость протеза.

Такой подход к проектированию приводит к проблемной ситуации: недостаточной эффективности использования жестко ограниченного внутреннего пространства протеза, увеличения веса и уменьшения срока автономной работы изделия в целом.

Рассмотрим один из вариантов решения проблемы, а именно применение специально спроектированных электродвигателей, которые будут оптимизированы для эксплуатации в условиях бионического протеза.

4. Предлагаемые варианты применения специальных электрических машин в бионических протезах

Рассматривая перспективы применения специальных электрических машин, можно выделить три отдельные их «точки применения», как показано на рис. 4 [29].

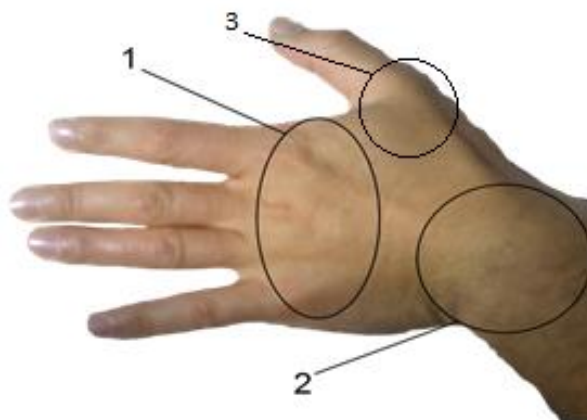


Рис. 4. Точки применения специальных электродвигателей на примере органической кисти

Первой «точкой применения» станет обеспечение подвижности пальцев. В текущих вариантах протезов движение пальца обеспечивается путём применения традиционной вращающейся машины и передаточного механизма.

С точки зрения обеспечения экономии места и увеличения отказоустойчивости перспективным вариантом является замена используемого в данный момент линейного актуатора на линейный двигатель, конструкция которого в настоящее время достаточно хорошо отработана как отечественными, так и зарубежными авторами [30–35].

Линейный двигатель может быть, как плоского исполнения, так и цилиндрического. Преимуществом плоского исполнения является большее удобство расположения внутри корпуса протеза, цилиндрическое исполнение же имеет лучшие характеристики из-за замкнутого магнитопровода. В условиях необходимости жесткой экономии энергии для увеличения срока автономной работы выбор цилиндрического линейного двигателя видится более обоснованным.

Следует отметить недостаток применения линейных двигателей, так как используемая на данный момент конструкция позволяет задействовать редуктор, то развиваемое единичным пальцем усилие будет больше при сопоставимых параметрах питания. Однако, учитывая текущее развитие протезов, можно сказать, что вопрос развиваемого усилия стоит не столь остро, так как бионический протез изначально не рассчитан на использование при силовых воздействиях. Усреднённое значение усилия сжатия кисти мужчины в возрасте 20 лет составляет 48 кгс или около 470 Н. Упрощая и принимая, что усилие развивается только пальцами, без учёта мышц самой кисти, то усилие, развиваемое двигателем, обеспечивающим сжатие пальца, должно составлять 94 Н (у рассмотренных выше протезов усилие на палец в среднем составляет около 10 Н), а достижение такого значения при соблюдении прочих условий становится крайне затруднительным.

Второй «точкой применения» становится обеспечение подвижности кисти в целом, а именно имитация запястья и мышц, отвечающих за наклоны. Основной проблемой в данном случае становится обеспечение кисти сразу нескольких степеней свободы, а именно наклоны в плоскостях XZ и YZ , а также вращение вокруг оси Z .

Третьей «точкой применения» является основание противостоящего пальца, которому также нужно обеспечить подвижность в двух плос-

костях. Наиболее распространённым на данный момент способом обеспечения множественных степеней свободы рабочего органа является использование нескольких традиционных вращательных двигателей, что приводит к массивности и чрезмерному использованию пространства.

Перспективной заменой может стать сферический двигатель, способный обеспечить сразу как вращение вокруг оси, так и наклоны относительно неё. Варианты конструкции сферического двигателя активно рассматриваются научным сообществом.

На данный момент в связи с продолжающимся развитием конструкции сферических двигателей классификация их ещё не устоялась, поэтому выбор конструкции несколько усложняется. Конструкция, подробно описанная в статьях [36–38], имеет очевидные проблемы с системой управления, которая становится чрезмерно громоздкой из-за необходимости «ручного» управления каждой из катушек. Выбор между конструкцией с несколькими статорными кольцами [39, 40] и конструкцией с разнесёнными магнитным цепями наклона и вращения [41] стоит сделать в сторону последней. Это обусловлено как большим удобством управления, так и большим КПД при наклоне оси вращения, что является наиболее частым типом движения кисти.

Вариант расположения предлагаемых двигателей в условном корпусе протеза показан на рис. 5. Корпус протеза показан условно, слева – условный корпус кисти, справа – предплечья. Цилиндрические линейные двигатели предполагается использовать для движения пальцев, сферические – для движения кисти и противостоящего пальца.

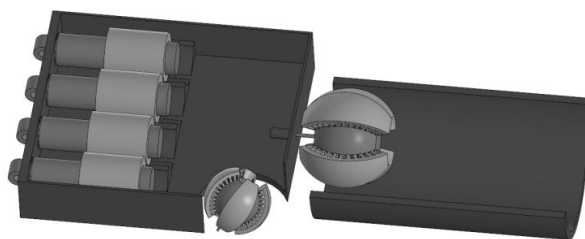


Рис. 5. Вариант расположения специальных двигателей в корпусе протеза

Необходимо учесть, что замена применяющихся двигателей будет целесообразна только в том случае, когда новые двигатели будут иметь или полное преимущество, став полноценной заменой, или частичное, став альтернативным решением.

Для сравнения применяемых на данный момент линейных актуаторов с предлагаемыми двигателями, во-первых, необходимо определиться с параметрами питания. Предполагаемые параметры примем, исходя из усреднённых имеющихся данных по производимым протезам и используемых в Ada V1.1 актуаторов, а именно: питание 7,4 В, емкость аккумулятора 1500 мАч.

Одним из наиболее важных параметров для протеза является время автономной работы, а следовательно, важно ограничить токопотребление двигателей. Зададимся током, равным 0,4 А, для двигателей, обеспечивающих подвижность пальцев и 0,8 А для двигателя запястья. Предполагая, что все двигатели работают одновременно, потребляемый ток составит 4,48 А.

Время цикла работы примем равным 1,6 с, следовательно, при заданной емкости аккумулятора протез совершит 1200 полных циклов перемещения. Далее требуется оценить усилия, которые развивают двигатели при потребляемом токе. Для линейных цилиндрических двигателей это возможно сделать по формуле:

$$F = \alpha \cdot \pi \cdot I_{\text{л}} \cdot B \cdot D \cdot l_{\text{мод}}, \quad (1)$$

где $I_{\text{л}}$ – линейная токовая нагрузка, α – коэффициент полюсного деления, D – диаметр вторичного элемента между серединами воздушного зазора, B – магнитная индукция в зазоре, $l_{\text{мод}}$ – длина активной части модуля индуктора [42–44].

Преобразуя (1) и подставляя принятые для оценки значения, получим:

$$F = 0,7\pi \cdot \frac{15 \cdot 0,4}{1,5 \cdot 10^{-3}} \cdot 1,2 \cdot 12 \cdot 10^{-3} \cdot 60 \cdot 10^{-3} = 7,6 \text{ Н}. \quad (2)$$

Индукция в зазоре для проверочного расчета принята чуть меньше по сравнению с остаточной индукцией постоянного магнита (NeFB), габаритные размеры приняты, исходя из возможности удобного размещения в корпусе кисти.

Оценка усилия, развиваемого сферическим двигателем, сложнее, так как теория их проектирования на данный момент находится в активной разработке, а данных по установленным в запястьях протезов двигателям производители не приводят. Исходя из изложенного выше, применим косвенную оценку из расчёта мощности двигателя при заданных габаритах.

С некоторыми допущениями сферический двигатель можно рассматривать как традиционную вращающуюся машину, если взять поперечное сечение, проходящее через центр катушек наклона.

Обратимся к хорошо известному уравнению синхронной машины:

$$l_{\delta} = \frac{6,1S'}{\alpha_{\delta} \cdot k_B \cdot k_{об} \cdot A \cdot B_{ном} \cdot D^2 \cdot n_{ном}}. \quad (3)$$

Необходимо произвести обратный расчет для оценки мощности двигателя при данных габаритах.

Для этого преобразуем формулу (3) к виду:

$$S' = \frac{A \cdot B_{ном} \cdot k_{об} \cdot k_B \cdot \alpha_{\delta} \cdot D^2 \cdot l_{\delta} \cdot n_{ном}}{6,1} = 1,8 \text{ Вт}. \quad (4)$$

В данном случае, l_{δ} – длина дуги статора по оси вращения [41], равная 60,6 мм, D – внутренний диаметр статора, равный 70 мм, номинальная скорость принята из учёта прохождения 60° за 1,6 с.

Необходимо отметить, что реальная мощность на выводном валу двигателя будет несколько меньше, так как данная формула не учитывает потери.

Параметры, полученные в ходе оценочного расчёта, сравнимы с параметрами используемых на данный момент двигателей, а следовательно, можно заключить, что применение цилиндрических линейных и сферических двигателей может стать приемлемой альтернативой имеющимся на данный момент вариантам.

Заключение

Основные результаты представленного исследования заключаются в следующем:

1. Выявлена проблемная ситуация недостаточной эффективности использования внутреннего пространства протеза при применении традиционных электродвигателей.

2. Предложен путь разрешения проблемной ситуации за счет разработки специальных электрических машин.

3. Обоснованы три потенциальные «точки применения» специальных электродвигателей, показанные на рис. 4.

4. Для движения пальцев предложено использовать цилиндрические линейные двигатели.

5. Для движения кисти в целом и противостоящего пальца предложено использовать сферические двигатели.

6. Предложен вариант компоновки электропривода протеза, показанный на рис. 5, такая схема позволит уменьшить вес, улучшит внутреннюю компоновку и отказоустойчивость бионического протеза.

7. Проведён оценочный расчёт, позволяющий провести грубое сравнение предложенных вариантов с имеющимися и показавший их сопоставимость.

В целом предложенные решения позволят уменьшить объем, отводимый в протезе под двигательную систему, уменьшить вес и шум, улучшить компоновку, оптимизировать энергопотребление, являясь альтернативой традиционным вращающимся машинам

Полученные результаты могут быть использованы не только в протезировании, но и при разработке манипуляторов роботов-андроидов.

Библиографический список

1. Митиенко, М.В. Анализ рынка бионических протезов / М.В. Митиенко, А.С. Одинцова, Д.А. Семькина // Скиф. Вопросы студенческой науки. – 2021. – № 1 (53). – С. 26–30.

2. Общая численность инвалидов по группам инвалидности [Электронный ресурс]. – URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/13964> (дата обращения: 20.12.2023).

3. I-limb quantum [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.ossur.com/en-us/prosthetics/arms/i-limb-quantum> (дата обращения: 21.12.2023).

4. I-digit quantum [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.ossur.com/en-us/prosthetics/arms/i-digits-quantum> (дата обращения: 21.12.2023).

5. I-limb instruction for use [Электронный ресурс]. – URL: https://media.ossur.com/ossur-dam/image/upload/pi-documents-global/iLimb_Ultra.pdf (дата обращения: 21.12.2023).

6. I-digit instruction for use [Электронный ресурс]. – URL: https://media.ossur.com/ossur-dam/image/upload/pi-documents-global/iDigits_Quantum.pdf (дата обращения: 21.12.2023).

7. Bibionic EQD [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.ottobock.com/ru-ru/product/8E70> (дата обращения: 22.12.2023).

8. Bebionic user guide [Электронный ресурс]. – URL: https://www.ottobockus.com/media/local-media/prosthetics/upper-limb/files/14112_bebionic_user_guide_lo.pdf (дата обращения: 21.12.2023).

9. Bebionic руководство по применению [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.ottobock.com/ru-ru/product/8E70> (дата обращения: 21.12.2023).

10. Bebionic3 technical information [Электронный ресурс]. – URL: <https://accessprosthetics.com/wp-content/uploads/2017/06/bebionic3-technology.pdf> (дата обращения: 21.12.2023).

11. Michelangelo Hand 8E500 руководство по применению [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.ottobock.com/ru-ru/product/8E500> (дата обращения: 22.12.23).

12. Embrace the everyday with michelangelo [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.ottobockus.com/media/local-media/prosthetics/upper-limb/michelangelo/files/embrace-the-everyday-with-michelangelo.pdf> (дата обращения: 22.12.2023).

13. Michelangelo [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.ottobock.com/ru-ru/product/8E500> (дата обращения: 22.12.2023).

14. ADA V1.1 assembly instructions [Электронный ресурс]. – URL: <https://openbionicslabs.com/obtutorials/ada-v1-assembly> (дата обращения: 24.12.2023).

15. PQ12-P Linear Actuator with Feedback 30:1 12 volts Technical Specs [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.actuonix.com/pq12-30-12-p> (дата обращения: 24.12.2023).

16. Баталов, А.В. Регистрация и обработка сигнала биоэлектрической активности мышц для управления приводом бионического протеза / А.В. Баталов, О.В. Веселов // Современные наукоемкие технологии. – 2020. – № 12-2. – С. 263–268. DOI: 10.17513/snt.38444

17. Панов, А.В. Система управления бионическим протезом на основе электромиографии / А.В. Панов, К.А. Миндров, А.А. Кузнецов // Инженерный вестник Дона. – 2021. – № 8 (80). – С. 151–162.

18. Создание системы автоматического управления бионическим роботизированным протезом голени / Г.Н. Буров, О.Л. Белянин, В.А. Большаков, А.С. Дробаха // Физическая и реабилитационная медицина. – 2022. – Т. 4, № 4. – С. 44–50. DOI: 10.26211/2658-4522-2022-4-4-44-50.

19. Бионическое управление протезом верхней конечности / А.Н. Спиркин, Н.С. Королев, А.С. Ишков, В.С. Маркелов // Надежность и качество: тр. междунар. симпоз. – 2020. – Т. 2. – С. 176–178.

20. Spirkin, A.N. Bionic Prosthesis Control System with Kinesthetic Sensations / A.N. Spirkin // 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus). – St. Petersburg, Moscow, Russia, 2021. – P. 1849–1851. DOI: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396283

21. Mechatronic system design and development of iROD: EMG controlled bionic prosthesis for Middle- Third forearm amputee / R.A. Vergaray, R.F. Del Aguila, G.A. Avellaneda, R. Palomares, J. Cornejo, J.A. Cornejo-Aguilar // 2021 IEEE Fifth Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM). – Cuenca, Ecuador, 2021. – P. 1–5. DOI: 10.1109/ETCM53643.2021.9590715

22. Powered prosthesis control during walking, sitting, standing, and non-weight bearing activities using neural and mechanical inputs / A.M. Simon, N.P. Fey, K.A. Ingraham, A.J. Young, L.J. Hargrove // 2013 6th International IEEE/EMBS Conference on Neural Engineering (NER). – San Diego, CA, USA, 2013. – P. 1174–1177. DOI: 10.1109/NER.2013.6696148

23. Terrazas-Rodas, D. The use of invasive and non-invasive electrodes in novel technology of upper limb prostheses: a current review / D. Terrazas-Rodas, J. Carrión-Pérez // 2023 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA). – Surabaya, Indonesia, 2023. – P. 192–199. DOI: 10.1109/ISITIA59021.2023.10221177

24. Bodin, O.N. The manipulation of bionic prosthesis using neural network processing information principles / O.N. Bodin, G.A. Solodimova, A.N. Spirkin // 2020 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT), Moscow, Russia, 2020. – P. 1–4. DOI: 10.1109/MWENT47943.2020.9067436

25. Нейросетевое управление бионическим протезом / Д.А. Бранчукова, О.О. Перегудова, А.И. Киллер [и др.] // Вестник молодёжной науки России. – 2020. – № 1. – С. 17.

26. Разработка блока очувствления бионического протеза / А.А. Ткалич, О.Д. Бондарев, Е.А. Рудик [и др.] // Вестник молодёжной науки России. – 2021. – № 2.

27. Горбатенкова, А.И. Разработка и реализация макета бионического протеза кисти руки / А.И. Горбатенкова, В.И. Бондаренко // Вестник Донецк. нац. ун-та. Сер. Г: Технические науки. – 2022. – № 4. – С. 2–33.

28. Пестриков, П.П. Составление расчетной схемы трехзвенного механизма протеза пальца в условии статического равновесия / П.П. Пестриков, Т.В. Пестрикова // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2018. – № 1. – С. 45–50.

29. Кисть (анатомия) [Электронный ресурс]. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%B8%D1%81%D1%82%D1%8C_%28%D0%B0%D0%BD%D0%B0%D1%82%D0%BE%D0%BC%D0%B8%D1%8F%29 (дата обращения: 11.01.2024).

30. A cylindrical linear valve electric motor for the executive mechanism of material application research / A.D. Korotaev, A.T. Kluchnikov, S.A. Lokteev, D.A. Oparin, S.V. Shutemov // 2020 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS), Ufa, Russia, 2020. – P. 1–4. DOI: 10.1109/ICOECS50468.2020.9278484

31. Chen, H. A novel structure single-phase tubular switched reluctance linear motor / H. Chen, R. Nie, W. Yan // IEEE Transactions on Magnetics. – 2017. – Vol. 53, no. 11. – P. 1–4, Nov., Art no. 8205804. DOI: 10.1109/TMAG.2017.2700007

32. Force modeling and analysis of a tube flux-switching transverse-flux permanent magnet linear motor / D. Fu, K. Wu, P. Zheng, Q. Yu, X. Wu // IEEE Transactions on Industry Applications. – July-Aug. 2022. – Vol. 58, no. 4. – P. 4575–4586. DOI: 10.1109/TIA.2022.3168254

33. Mohammadpour, A. Optimal design and prototyping of a five-phase direct-drive permanent magnet linear motor / A. Mohammadpour, L. Parsa // 2014 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, Ischia, Italy, 2014. – P. 449–454. DOI: 10.1109/SPEEDAM.2014.6871970

34. Su, Y. Optimization of thrust fluctuation of 2D permanent magnet synchronous linear motor based on ANSYS Maxwell / Y. Su, X. Wang // 2022 2nd International Conference on Electrical Engineering and Control Science (IC2ECS). – Nanjing, China, 2022. – P. 593–596. DOI: 10.1109/IC2ECS57645.2022.10087973

35. Basic design equations of linear electric machines / N. Govindpure, R. Hipparagi, A. Kumar, D.B. Talange, V.B. Bhole // 2018

IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES). – Chennai, India, 2018. – P. 1–6. DOI: 10.1109/PEDES.2018.8707649

36. A New adaptive analytical model for the spherical reluctance motor based on hybrid trigonometric function-power function / M. Shi, Q. Wang, G. Li, J. Xu, Q. Han, Q. Ye // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – June 2023. Vol. 70, no. 6. – P. 6099–6109. DOI: 10.1109/TIE.2022.3199860

37. Design and analysis of permanent magnetic spherical motor with cylindrical poles / Zhe Qian, Qunjing Wang, Guoli Li, Xiwen Guo, Cungang Hu, Hui Yan // 2013 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). – Busan, Korea (South). – 2013. – P. 644–649. DOI: 10.1109/ICEMS.2013.6754492

38. Electromagnetic modeling and analysis of 3-DOF permanent magnet spherical motor using magnetic equivalent circuit method / G. Cheng, X. Guo, Y. Wen, Q. Wang, G. Li, R. Zhou // 2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). – Jeju, Korea (South), 2018. – P. 2643–2648. DOI: 10.23919/ICEMS.2018.8548998

39. Chai, F. A novel tiered type permanent magnet spherical motor and its rotor orientation measurement principle / F. Chai, L. Gan, L. Chen // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 15303–15312. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2966786

40. Design and analysis of a novel multi-DOF PM spherical motor / F. Chai, L. Gan, Y. Pei, L. Yuan // 2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). – Harbin, China, 2019. – P. 1–6. DOI: 10.1109/ICEMS.2019.8922027

41. Design and analysis of double stator swing rotating permanent magnet spherical motor / Q. Chen, X. Yang, G. Zhong, B. Zeng, S. Zhao, J. Cao // IEEE Transactions on Magnetics. – Aug. 2022. – Vol. 58, no. 8. – P. 1–12. – Art no. 8204712. DOI: 10.1109/TMAG.2022.3180683

42. Расчет тягового усилия цилиндрического линейного вентильного двигателя для привода плунжерного насоса / В.В. Шапошников, Р.О. Токарев, А.Д. Коротаев, Е.А. Чабанов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2019. – № 32. – С. 183–198.

43. Расчет характеристик цилиндрического линейного вентильного двигателя / В.В. Шапошников, Р.О. Токарев, А.Д. Коротаев, Е.А. Чабанов // *Инновационные технологии: теория, инструменты, практика*. – 2018. – Т. 1. – С. 375–382

44. Чирков, Д.А. Расчет основных параметров цилиндрического линейного вентильного двигателя по схеме замещения / Д.А. Чирков, А.Д. Коротаев, А.Т. Ключников // *Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике*. – 2016. – Т. 1. – С. 144–149.

References

1. Mitienko M.V., Odintsova A.S., Semykina D.A. Analiz rynka bionicheskikh protezov [Market analysis of bionic prostheses]. *Skif. Voprosy studentcheskoi nauki*, 2021, no. 1 (53), pp. 26-30.

2. Obshchaia chislennost' invalidov po gruppam invalidnosti [Total number of people with disabilities by group], available at: <https://rosstat.gov.ru/folder/13964> (accessed 20 December 2023).

3. I-limb quantum, available at: <https://www.ossur.com/en-us/prosthetics/arms/i-limb-quantum> (accessed 21 December 2023).

4. I-digit quantum, available at: <https://www.ossur.com/en-us/prosthetics/arms/i-digits-quantum> (accessed 21 December 2023).

5. I-limb instruction for use, available at: https://media.ossur.com/ossur-dam/image/upload/pi-documents-global/iLimb_Ultra.pdf (accessed 21 December 2023).

6. I-digit instruction for use, available at: https://media.ossur.com/ossur-dam/image/upload/pi-documents-global/iDigits_Quantum.pdf (accessed 21 December 2023).

7. Bibionic EQD, available at: <https://www.ottobock.com/ru-ru/product/8E70> (дата обращения: 22.12.2023)

8. Bebionic user guide, available at: https://www.ottobockus.com/media/local-media/prosthetics/upper-limb/files/14112_bebionic_user_guide_lo.pdf (accessed 21 December 2023).

9. Bebionic rukovodstvo po primeneniuu [Bebionic instructions for use], available at: <https://www.ottobock.com/ru-ru/product/8E70> (accessed 21 December 2023).

10. Bebionic3 technical information, available at: <https://accessprosthetics.com/wp-content/uploads/2017/06/bebionic3-technology.pdf> (accessed 21 December 2023).

11. Michelangelo Hand 8E500 rukovodstvo po primeneniiu [Michelangelo hand 8E500 instructions for use], available at: <https://www.ottobock.com/ru-ru/product/8E500> (accessed 22 December 23).

12. Embrace the everyday with Michelangelo, available at: <https://www.ottobock.com/media/local-media/prosthetics/upper-limb/michelangelo/files/embrace-the-everyday-with-michelangelo.pdf> (accessed 21 December 2023).

13. Michelangelo, available at: <https://www.ottobock.com/ru-ru/product/8E500> (accessed 22 December 2023).

14. ADA V1.1 assembly instructions, available at: <https://openbionicslabs.com/obtutorials/ada-v1-assembly> (accessed 24 December 2023).

15. PQ12-P Linear Actuator with Feedback 30:1 12 volts Technical Specs, available at: <https://www.actuonix.com/pq12-30-12-p> (accessed 24 December 2023).

16. Batalov A.V., Veselov O.V. Registratsiia i obrabotka signala bioelektricheskoi aktivnosti myshts dlia upravleniia privodom bionicheskogo proteza [Registration and processing of the muscle bioelectric activity signal to control the drive of a bionic prosthesis]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*, 2020, no. 12-2, pp. 263-268. DOI: 10.17513/snt.38444

17. Panov A.V., Mindrov K.A., Kuznetsov A.A. Sistema upravleniia bionicheskim protezom na osnove elektromiografii [Control system for a bionic prosthesis based on electromyography]. *Inzhenernyi vestnik Dona*, 2021, no. 8 (80), pp. 151-162.

18. Burov G.N., Belianin O.L., Bol'shakov V.A., Drobakha A.S. Sozdanie sistemy avtomaticheskogo upravleniia bionicheskim robotizirovannym protezom goleni [Creation of an automatic control system for a bionic robotic lower leg prosthesis]. *Fizicheskaiia i rehabilitatsionnaia meditsina*, 2022, vol. 4, no. 4, pp. 44-50. DOI: 10.26211/2658-4522-2022-4-4-44-50.

19. Spirkin A.N., Korolev N.S., Ishkov A.S., Markelov V.S. Bionicheskoe upravlenie protezom verkhnei konechnosti [Bionic control of an upper limb prosthesis]. *Nadezhnost' i kachestvo. Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma*, 2020, vol. 2, pp. 176-178.

20. Spirkin A.N. Bionic Prosthesis Control System with Kinesthetic Sensations. *2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)*. St. Petersburg, Moscow, Russia, 2021, pp. 1849-1851. DOI: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396283

8C_%28%D0%B0%D0%BD%D0%B0%D1%82%D0%BE%D0%BC%D0%B8%D1%8F%29 (accessed 11 January 2024).

30. Korotaev A.D., Kluchnikov A.T., Lokteev S.A., Oparin D.A., Shutemov S.V. A cylindrical linear valve electric motor for the executive mechanism of material application research. *2020 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS)*. Ufa, Russia, 2020, pp. 1-4. DOI: 10.1109/ICOECS50468.2020.9278484

31. Chen H., Nie R., Yan W. A novel structure single-phase tubular switched reluctance linear motor. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2017, vol. 53, no. 11, pp. 1-4, Nov., Art no. 8205804. DOI: 10.1109/TMAG.2017.2700007

32. Fu D., Wu K., Zheng P., Yu Q., Wu X. Force modeling and analysis of a tube flux-switching transverse-flux permanent magnet linear motor. *IEEE Transactions on Industry Applications*, July-Aug. 2022, Vol. 58, no. 4, pp. 4575-4586. DOI: 10.1109/TIA.2022.3168254

33. Mohammadpour A., Parsa L. Optimal design and prototyping of a five-phase direct-drive permanent magnet linear motor. *2014 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, Ischia, Italy*, 2014, pp. 449-454. DOI: 10.1109/SPEEDAM.2014.6871970

34. Su Y., Wang X. Optimization of thrust fluctuation of 2D permanent magnet synchronous linear motor based on ANSYS Maxwell. *2022 2nd International Conference on Electrical Engineering and Control Science (IC2ECS)*. Nanjing, China, 2022, pp. 593-596. DOI: 10.1109/IC2ECS57645.2022.10087973

35. Govindpure N., Hipparagi R., Kumar A., Talange D.B., Bhole V.B. Basic design equations of linear electric machines. *2018 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*. Chennai, India, 2018, pp. 1-6. DOI: 10.1109/PEDES.2018.8707649

36. Shi M., Wang Q., Li G., Xu J., Han Q., Ye Q. A New adaptive analytical model for the spherical reluctance motor based on hybrid trigonometric function-power function. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, June 2023, vol. 70, no. 6, pp. 6099-6109. DOI: 10.1109/TIE.2022.3199860

37. Zhe Qian, Qunjing Wang, Guoli Li, Xiwen Guo, Cungang Hu, Hui Yan. Design and analysis of permanent magnetic spherical motor with cylindrical poles. *2013 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*. Busan, Korea (South), 2013, pp. 644-649. DOI: 10.1109/ICEMS.2013.6754492

38. Cheng G., Guo X., Wen Y., Wang Q., Li G., Zhou R. Electromagnetic modeling and analysis of 3-DOF permanent magnet spherical motor using magnetic equivalent circuit method. *2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Jeju, Korea (South), 2018, pp. 2643-2648. DOI: 10.23919/ICEMS.2018.8548998

39. Chai F., Gan L., Chen L. A novel tiered type permanent magnet spherical motor and its rotor orientation measurement principle. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 15303-15312. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2966786

40. Chai F., Gan L., Pei Y., Yuan L. Design and analysis of a novel multi-DOF PM spherical motor. *2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Harbin, China, 2019, pp. 1-6. DOI: 10.1109/ICEMS.2019.8922027

41. Chen Q., Yang X., Zhong G., Zeng B., Zhao S., Cao J. Design and analysis of double stator swing rotating permanent magnet spherical motor. *IEEE Transactions on Magnetics*, Aug. 2022, vol. 58, no. 8, pp. 1-12, Art no. 8204712. DOI: 10.1109/TMAG.2022.3180683

42. Shaposhnikov V.V., Tokarev R.O., Korotaev A.D., Chabanov E.A. Raschet tiagovogo usiliia tsilindricheskogo lineinogo ventil'nogo dvigatel'ia dlia privoda plunzhernogo nasosa [Calculation of the thrust force of a cylindrical linear valve motor to drive a plunger pump]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2019, no. 32, pp. 183-198.

43. Shaposhnikov V.V., Tokarev R.O., Korotaev A.D., Chabanov E.A. Raschet kharakteristik tsilindricheskogo lineinogo ventil'nogo dvigatel'ia [Calculation of characteristics of a cylindrical linear valve motor]. *Innovatsionnye tekhnologii: teoriia, instrumenty, praktika*, 2018, vol. 1, pp. 375-382.

44. Chirkov D.A., Korotaev A.D., Kliuchnikov A.T. Raschet osnovnykh parametrov tsilindricheskogo lineinogo ventil'nogo dvigatel'ia po skheme zameshcheniia [Calculation of the main parameters of a cylindrical linear valve motor using an equivalent circuit]. *Avtomatizatsiia v elektroenergetike i elektrotekhnike*, 2016, vol. 1, pp. 144-149.

Сведения об авторах

Плюснин Александр Павлович (Пермь, Российская Федерация) – аспирант кафедры «Электротехника и электромеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: plus20100@mail.ru).

Кавалеров Борис Владимирович (Пермь, Российская Федерация) – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электротехника и электромеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: kbv@pstu.ru).

About the authors

Aleksanrd P. Plyusnin (Perm, Russian Federation) – Graduate Student department of Electrical engineering and electrical mechanic Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: plus20100@mail.ru).

Boris V. Kavalerov (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Electrical Engineering and Electromechanics Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky pr., 29, e-mail: kbv@pstu.ru).

Поступила: 12.01.2024. Одобрена: 06.03.2024. Принята к публикации: 20.04.2024.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов по отношению к статье.

Вклад авторов. Авторы сделали равноценный вклад в подготовку статьи.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Плюснин, А.П. Перспективы применения специальных электрических двигателей в бионическом протезировании / А.П. Плюснин, Б.В. Кавалеров // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2024. – № 49. – С. 155–175. DOI: 10.15593/2224-9397/2024.1.08

Please cite this article in English as:

Plyusnin A.P., Kavalero B.V. Prospects for the application of special electric motors in bionic prosthetics. *Perm National Research Polytechnic University Bulletin. Electrotechnics, information technologies, control systems*, 2024, no. 49, pp. 155-175. DOI: 10.15593/2224-9397/2024.1.08