

УДК 004.4:617

DOI <https://doi.org/10.32782/IT/2023-4-6>

### **Віра ЛЮБЧЕНКО**

доктор технічних наук, професор кафедри інженерії програмного забезпечення, Національний університет «Одеська політехніка», просп. Шевченка, 1, м. Одеса, Україна, 65044, [lvv@op.edu.ua](mailto:lvv@op.edu.ua)

ORCID: 0000-0002-4611-7832

Scopus Author ID: 56667638800

### **Данило ЧУМАЧЕНКО**

аспірант кафедри інженерії програмного забезпечення, Національний університет «Одеська політехніка», просп. Шевченка, 1, м. Одеса, Україна, 65044, [chumachdk@gmail.com](mailto:chumachdk@gmail.com)

ORCID: 0009-0000-1477-534X

**Бібліографічний опис статті:** Любченко, В., Чумаченко, Д. (2023). Модель якості програмного забезпечення для біонічних протезів. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 4, 51–57, doi: <https://doi.org/10.32782/IT/2023-4-6>

## **МОДЕЛЬ ЯКОСТІ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ БІОНІЧНИХ ПРОТЕЗІВ**

Розробка біонічних протезів та програмного забезпечення, що їх супроводжує, за останні роки значно просулася вперед, пропонуючи користувачам інноваційні способи контролю та взаємодії зі своїми протезами. Це дослідження заглиблюється в різні аспекти розробки програмного забезпечення для біонічних протезів, зосереджуючись на отриманні даних, передачі тактильних відчуттів і зворотного зв'язку, математичній обробці даних і заходах забезпечення якості. Основна увага приділяється методам отримання даних від біонічних протезів, які включають міоелектричне пряме управління, розпізнавання міоелектричних патернів і управління за допомогою механоміограми. Кожен метод пов'язаний з унікальними проблемами, такими як зовнішні шумові перешкоди та м'язова втома, які вимагають надійних програмних рішень для збору, інтерпретації та обробки даних. Передача тактильних відчуттів і зворотного зв'язку – ще один важливий аспект, який розглядається в цьому дослідженні, з акцентом на остеоперцепцію, простий тактильний зворотний зв'язок і електричну стимуляцію нервів. Програмне забезпечення відіграє ключову роль у точному відтворенні сигналів управління, щоб забезпечити користувачам реалістичні тактильні відчуття і зворотний зв'язок, покращуючи їх загальний досвід користування протезом і функціональність. Досліджуються математичні моделі та методи обробки даних, включаючи метод Кейна, моделювання аферентної активності, ієрархічну класифікацію та методи статистичного аналізу. Ці математичні інструменти допомагають зрозуміти рухи користувача, коактивацію м'язів та ефективність систем управління протезами. Нарешті, запропоновано комплексну модель якості програмного забезпечення для біонічних протезів, що охоплює вісім ключових характеристик: надійність, безпека, простота використання, швидкість реагування, адаптивність, довговічність, сумісність і конфіденційність. Хоча деякі характеристики відповідають встановленим моделям якості програмного забезпечення, таким як SQuaRE, додаткові атрибути, такі як безпека, адаптивність і довговічність, розроблені спеціально для програмного забезпечення для біонічних протезів.

**Ключові слова:** Біонічні протези, Розробка програмного забезпечення, Управління протезами, Тактильний зворотний зв'язок, Математичне моделювання, Забезпечення якості.

### **Vira LIUBCHENKO**

Doctor of Technical Sciences, Professor at the Software Engineering Department, Odesa Polytechnic National University, 1, Shevchenko Ave, Odesa, Ukraine, 65044, [lvv@op.edu.ua](mailto:lvv@op.edu.ua)

ORCID: 0000-0002-4611-7832

Scopus Author ID: 56667638800

### **Danylo CHUMACHENKO**

Postgraduate Student at the Software Engineering Department, Odesa Polytechnic National University, 1, Shevchenko Ave, Odesa, Ukraine, 65044, [chumachdk@gmail.com](mailto:chumachdk@gmail.com)

ORCID: 0009-0000-1477-534X

**To cite this article:** Liubchenko, V., Chumachenko, D. (2023). Model yakosti prohramnoho zabezpechennia dlia bionichnykh proteziv [Quality model for software for bionic prostheses]. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 4, 51–57, doi: <https://doi.org/10.32782/IT/2023-4-6>

## QUALITY MODEL FOR SOFTWARE FOR BIONIC PROSTHESES

*The development of bionic prostheses and their accompanying software has advanced significantly in recent years, offering innovative ways for users to control and interact with their prosthetic limbs. This research delves into various aspects of software development for bionic prostheses, focusing on obtaining data, transmitting tactile sensations and feedback, mathematical processing of data, and quality assurance measures. One primary focus is on the methods of obtaining data from bionic prostheses, which include myoelectric direct control, recognition of myoelectric patterns, and mechanomyogram control. Each method presents unique challenges, such as external noise interference and muscle fatigue, which necessitate robust software solutions for data collection, interpretation, and processing. Transmission of tactile sensations and feedback is another crucial aspect addressed in this research, with emphasis on osteoperception, simple tactile feedback, and electrical nerve stimulation. Software plays a pivotal role in accurately reproducing control signals to provide users with realistic tactile sensations and feedback, enhancing their overall prosthetic limb experience and functionality. Mathematical models and methods for data processing are explored, including the Kane method, afferent activity modeling, hierarchical clustering, and statistical analysis techniques. These mathematical tools aid in understanding user movements, muscle coactivation, and the effectiveness of prosthetic control systems. Finally, a comprehensive quality model for bionic prosthesis software is proposed, encompassing eight key characteristics: reliability, security, ease of use, responsiveness, adaptability, durability, interoperability, and privacy. While some characteristics align with established software quality models like SQuaRE, additional attributes such as safety, adaptability, and durability are tailored specifically for bionic prosthetic software.*

**Key words:** *Bionic prostheses, Software development, Prosthetic control, Tactile feedback, Mathematical modeling, Quality assurance.*

**Вступ.** Біонічні протези – це технологічні пристрої, які створені для відновлення або розширення функціональності втрачених або пошкоджених частин людського тіла. Вони є синтезом біологічних і штучних компонентів, і надають можливість користувачам відновити моторику, тактильні відчуття і навіть частково відновити відчуття дотику.

Історія біоніки розпочала свій розвиток з появою нових матеріалів та технологій, які дозволили створювати пристрої, натхненні біологічними системами. Одним з ключових моментів стало відкриття способів з'єднання скла та металу, що послужило відправною точкою для розробки нейропротезів та інших інноваційних пристроїв. Розвиток склокераміки та припоїв на основі скла дав можливість широкого застосування різноманітних матеріалів в медичних імплантатах, відкриваючи нові горизонти для біоніки та її потенціалу в поліпшенні якості життя людей (Donaldson, 2016).

У США налічується близько 2 мільйонів людей з ампутованими кінцівками, при цьому щорічно проводиться 185 000 ампутацій. Згідно зі статистичними даними Німеччини, Італії та Ірландії, в ЄС налічується близько 3,18 мільйона людей з ампутованими кінцівками (4,66 мільйона в усій Європі), і щорічно проводять близько 295 000 ампутацій (431 000 у всій Європі) (Bumbaširević, 2020).

Після початку війни в Україні проблема ампутованих кінцівок гостро постає перед нашим суспільством, адже величезна кількість людей зазнає травм своїх кінцівок і змушені замінювати їх протезами. Наразі достеменно не

відомо, як багато людей в Україні втратили свої біологічні кінцівки і скільки з них отримали або потребують протезів. Однак війна все ще триває і кількість людей, які потребують протезів, зростатиме.

Існує кілька типів біонічних протезів, що охоплюють різні галузі медичної практики. Приклади включають в себе біонічні протези для кінцівок (рук і ніг), а також протези для органів чуття, таких як очі або слухові апарати. Важливою складовою біонічних протезів є програмне забезпечення, яке керує їхньою функціональністю та взаємодією з людиною (Abrams, 2023). Програмне забезпечення для біонічних протезів відіграє вирішальну роль у забезпеченні синхронізації між штучними компонентами та біологічною системою організму. Воно дає змогу переводити нервові сигнали або інші форми команд від користувача в рухи або інші дії протеза. Ефективне програмне забезпечення забезпечує плавне й точне керування протезом, максимально наближаючи його функціональність до природних рухів.

Проблеми, з якими стикається розробка програмного забезпечення для біонічних протезів, охоплюють не тільки технічні аспекти, як-от сумісність і надійність, а й біологічні чинники (Hong-liu, 2009). Важливо враховувати індивідуальні особливості кожного користувача, оскільки адаптація до їхньої фізіології та психології відіграє вирішальну роль в успішній інтеграції протезів у їхнє повсякденне життя.

**Аналіз останніх досліджень.** Модель якості програмного забезпечення – це концептуальна структура, яка визначає ключові аспекти та

характеристики, за якими можна оцінити якість програмного продукту. Ці моделі надають відомості про те, як вимірювати, аналізувати та забезпечувати високий рівень якості у програмному забезпеченні протягом всього його життєвого циклу.

Зараз до основних характеристик, які враховуються в моделях якості програмного забезпечення, зазвичай включають функціональну придатність, надійність, ефективність, безпеку, спроможність утримуватися, переносимість, сумісність та зручність використання.

Існує кілька моделей якості програмного забезпечення, включаючи стандарти ISO/IEC 9126, ISO/IEC 25010, та інші, які надають керівництво для визначення, вимірювання та покращення якості програмного продукту. На їх основі Міжнародним консорціумом з якості програмного забезпечення (ISO/IEC JTC1/SC7) було розроблено модель SQuaRE (Software Quality Requirements and Evaluation), яка визначає підходи до оцінки та вимог до якості програмного забезпечення.

Проте різноманітність застосувань програмного забезпечення призвела з часом до необхідності врахування додаткових характеристик якості, які притаманні конкретному типу застосувань. Наприклад, для програмних систем з елементами штучного інтелекту додатково розглядається 11 специфічних атрибутів якості (Nascimento, 2020).

**Актуальність роботи.** Вплив на якість програмного забезпечення для біонічних протезів біологічних чинників суттєво впливає на процес оцінювання якості програмного забезпечення. Розповсюджена модель якості SQuaRE стає неадекватною через неможливість визначити важливі характеристики та атрибути якості. Тому існує потреба в визначенні моделі якості програмного забезпечення для біонічних протезів.

**Метою роботи** є розширення моделі якості програмного забезпечення SQuaRE для забезпечення можливості оцінювання та контролю якості програмного забезпечення для біонічних протезів.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Існує багато способів взаємодії протезів і програмного забезпечення, яке дає змогу здійснювати контроль і комунікацію з користувачем. Ці системи характеризуються природною нестабільністю, сильними взаємозв'язками та нелінійністю.

**Способи отримання даних з біонічних протезів.** Способи отримання даних і передавання даних до біонічного протеза дуже різно-

манітні. Опишемо найбільш розповсюджені на практиці реалізації (Fermin, 2019):

1. Міоелектричний прямий контроль. Всередину кінцівки вбудовуються один або два міоелектричні датчики так, щоб вони контактували зі шкірою на поверхні кінцівки. Датчики призначені для виявлення м'язових рухів. Назва «прямий контроль» дана тому, що користувач повинен активувати певні м'язи, щоб керувати вибором режиму захоплення, а також діями відкриття і закриття.

2. Розпізнавання міоелектричних образів. У нових версіях біонічних протезів впроваджено розпізнавання міоелектричних структур замість прямого управління. Завдяки великій кількості датчиків тепер можна не тільки виявляти окремі м'язові рухи, а й ідентифікувати закономірності в цих рухах. Кожен зразок може бути пов'язаний з конкретною дією. Як результат, управління стає більш інтуїтивним, оскільки користувачу більше не потрібно активно напружувати окремі м'язи. Він просто мислить про переміщення своєї фантомної кінцівки так, ніби вона все ще присутня, і біонічна версія автоматично відображає його наміри.

3. Контроль механоміограми. Датчики механоміограми призначені для реєстрації механічних сигналів, що виникають під час скорочення м'язів, на відміну від датчиків електроміографії (ЕМГ), які реєструють електричні сигнали, що створюються м'язами під час їхньої активації.

Отже, завданням програмного забезпечення є коректна взаємодія і обробка отриманих даних датчиків з урахуванням їх специфіки. У випадку розпізнавання міоелектричних образів варто завжди звертати увагу на те, що зовнішні джерела шуму, такі як вітер, шум міста, серцебиття та інші, можуть впливати на інтерпретацію отриманих даних. Тому програмне забезпечення повинно не лише збирати, передавати та сегментувати дані датчиків, але й перевіряти їх на правильність та відповідність. У випадку використання механоміограми причиною невірних даних можуть виступати інші чинники, такі як втомленість м'язів, непередбачуваність сигналу, індивідуальні відмінності та інше. Отже, програмне забезпечення повинно не лише вміти збирати дані та працювати з ними, але й правильно їх інтерпретувати, сегментувати, бути зручним у використанні, розширюваним і, звичайно ж, безпечним.

**Передача тактильних відчуттів і зворотного зв'язку.** Частиною системи взаємодії між користувачем і біонічним протезом є передача тактильних відчуттів. Основними способами передачі тактильних відчуттів є (Fermin, 2019):

1. Остеоперцепція. Вібрації, що передаються від біонічної кінцівки через остеоінтегрований імплантат у кістку кукси кінцівки, є потенційно багатим джерелом інформації.

2. Простий тактильний зворотний зв'язок. Датчики, вбудовані в біонічні протези, зворотно зв'язуються з вібраторами, розміщеними в гнізді протеза. Ці вібратори використовують різні рівні і частоти вібрації для передачі інформації. Приклади такого використання включають передачу контакту з об'єктом (одиначна вібрація), а також сили стиснення (повторювані вібрації, можливо, зі збільшеною інтенсивністю).

3. Електрична стимуляція нервів. Системи зворотного зв'язку прагнуть стимулювати нервові клітини через шкіру і проміжні тканини. Це може призвести до того, що мозок сприйме певні відчуття у відсутній кінцівці, які можна абстрактно порівняти із сенсорним зворотним зв'язком від біонічного протезу. Наприклад, відчуття поколювання у відсутній руці може виникнути, коли біонічна рука взаємодіє з об'єктом. Це може надати користувачу більш реалістичні відчуття, ніж простий тактильний зворотний зв'язок, але обмеження інформації, яку можна передати в такий спосіб, залишаються суттєвими.

Стосовно аспекту передачі тактильних відчуттів програмне забезпечення повинно акцентувати не на сегментації або фільтрації шумів, а на характеристиках (сили або обмеженнях) керівних сигналів, що впливають на тактичні відчуття. Важливо на етапі проектування програмного забезпечення забезпечити коректне відтворення керівних сигналів, наприклад, сили натиску для вібрації, або мінімальної та максимальної напруги для електронної стимуляції. Ця інформація має бути строго конфіденційною та передаватися безпечним способом, що безумовно також має враховуватися при розробці методів взаємодії та впливу.

#### **Математичний апарат обробки даних.**

Отримані дані потребують адекватної обробки з метою забезпечення керування біонічним протезом. З цією метою застосовують різні математичні моделі і методи. Перелічимо найбільш вживані.

Метод Кейна являє собою метод моделювання динамічних систем, який дозволяє автоматично визначати динамічні рівняння через концепцію узагальнених швидкостей, часткових швидкостей і сил інерції (Menga, 2018). Цей метод дає змогу спростити математичне підґрунтя та обробляти складніші проблеми. Він також забезпечує вирази для моделювання та розробки керування, а також генерує прототипи

вихідного коду для рівнянь у вигляді звичайних диференціальних рівнянь.

Моделювання активності аферентів (Hardesty, 2020) – це моделювання, яке здійснюється з використанням рівнянь

$$Ia(v, l) = Av^{0.5} + Bl + C, \quad (1)$$

де  $Ia$  – швидкість аферентної активації,  $l$  – довжина м'яза, що змінюється в часі,  $v$  – швидкість її зміни та  $A, B, C$  – визначені експериментом константи.

Формула (1) дозволяє приблизно визначити активність аферентів під час руху. Це допомагає дослідникам зрозуміти, які зміни у фузиторному приводі можуть впливати на коактивацію м'язів.

Ієрархічна кластеризація – це метод аналізу структури кластерів, який використовується для порівняння структури кластерів довжини м'язів у різних положеннях із кластерною структурою стимульованої активності первинних аферентів. Це дає змогу оцінити схожість між довжиною м'язів і профілями активності аферентів за формулою

$$HVE = \begin{cases} 1 - r^2, & |r| > 0, p < \alpha \\ 1 + r^2, & |r| < 0, p < \alpha \\ 1, & |p| \geq \alpha \end{cases} \quad (2)$$

де  $r$  – коефіцієнт кореляції Пірсона, який вимірює силу і напрямок лінійного зв'язку між двома змінними,  $p$  – рівень значущості, який вказує, наскільки ймовірно отримати такі самі або більш екстремальні результати за умови, що нульова гіпотеза вірна, а – використовується для позначення параметра або коефіцієнта в рівнянні.

Часто застосовують методи статистичного аналізу (Lotti, 2020) як методи аналізу даних, що використовується для інтерпретації результатів експериментів і досліджень. Вони дозволяють оцінити відмінності між групами, визначити зв'язки між змінними та перевірити гіпотези. Зокрема, метод Колмогорова-Смирнова використовується для перевірки того, наскільки вибірка даних відповідає відомому розподілу. Він дає змогу оцінити, наскільки добре дані відповідають теоретичному розподілу. Метод дисперсійного аналізу (ANOVA) використовується для порівняння середніх значень трьох або більше груп, щоб визначити, чи є статистично значущі відмінності між ними. ANOVA дає змогу визначити, чи впливають різні чинники на залежну змінну.

Ці та інші методи використовуються на етапі моделювання поведінки за допомогою різних програм, таких як OpenSim (Camargo, 2022), що дають змогу моделювати можливі дані або

ситуації з подальшим застосуванням до математичного опрацювання та аналізу.

Оскільки математичний апарат має забезпечувати високу точність розрахунків, важливо враховувати, що його застосування повинно бути строго регламентовано і піддано глибокому аналізу і тестуванню перед тим, як буде використане в програмному забезпеченні. Якість програмного забезпечення повинна враховувати можливі відхилення, аналіз експериментів і досвідного використання, а самі алгоритми та методи повинні бути спробовані спочатку в модельних середовищах.

**Модель якості програмного забезпечення для біонічних протезів.** Наразі в галузі біонічного протезування працює багато компаній, які застосовують різні програмні рішення. В біонічних протезах найчастіше використовують вбудоване програмне забезпечення, але у багатьох версіях є і віддалене програмне забезпечення, що дає змогу протезу оновлювати компоненти, передавати аналітичні дані, взаємодіяти з про-

тезом. Програмне забезпечення функціонує шляхом збирання сигналів від датчиків і передавання їх до компонентів, відповідальних за оброблення даних.

Після узагальнення способів взаємодії протезів з програмним забезпеченням, а також описів наявних промислових рішень, можемо стверджувати, що модель якості містить вісім ключових характеристик (таблиця 1).

Як можна побачити, частина ключових характеристик – надійність, зручність використання, захищеність – є характеристиками моделі SQuaRE. Але додаються і специфічні характеристики, такі як безпека, адаптивність, довговічність.

**Висновки.** Вивчення різних методів отримання даних, передачі тактильних відчуттів і зворотного зв'язку та методів математичної обробки показало, що програмне забезпечення відіграє ключову роль у забезпеченні функціональності, зручності використання та загальної якості біонічних кінцівок.

Таблиця 1

### Характеристики якості програмного забезпечення для біонічних протезів

Характеристика якості	Опис характеристики
Надійність	Програмне забезпечення біонічних протезів повинно бути високонадійним, щоб забезпечити стабільну продуктивність і роботу в різних умовах. Надійність має вирішальне значення для того, щоб протези функціонували так, як очікується, без несподіваних збоїв.
Безпека	Програмне забезпечення повинно відповідати суворим стандартам і протоколам безпеки, щоб мінімізувати ризик травмування користувачів. Це включає в себе надійну обробку помилок, відмовистійкі механізми та ретельне тестування для виявлення та зменшення потенційних загроз безпеці.
Зручність використання	Програмне забезпечення повинно мати інтерфейс користувача, який дозволяє користувачам, часто з обмеженими можливостями, ефективно і комфортно контролювати свої протези. Крім того, налаштування та адаптивні функції можуть підвищити зручність використання, задовольняючи індивідуальні уподобання та потреби користувачів.
Швидкість реагування	Програмне забезпечення повинно швидко реагувати на дії користувача, забезпечуючи зворотний зв'язок у реальному часі та плавний контроль над протезом. Низька латентність і мінімальна затримка мають важливе значення, особливо під час діяльності, що вимагає точних рухів і координації.
Адаптивність	Програмне забезпечення для біонічних протезів має бути адаптивним, щоб пристосовуватися до змін у фізіології користувача, навколишньому середовищі та моделях використання з плином часу. Тобто має бути забезпечені постійна оптимізація та налаштування функціональності протеза на основі фідбеків і даних користувача.
Довговічність	Програмне забезпечення має бути розроблене таким чином, щоб витримувати суворі умови щоденного використання і потенційний знос, пов'язаний з протезами. Це має призвести до мінімізації потреби в обслуговуванні або заміні протезу.
Інтероперабельність	Програмне забезпечення біонічних протезів має бути сумісним з різними апаратними компонентами, датчиками та комунікаційними протоколами, щоб полегшити безперешкодну інтеграцію з іншими допоміжними технологіями та медичними пристроями.
Захищеність	Захист даних користувача і забезпечення конфіденційності чутливої інформації є критично важливими для програмного забезпечення для біонічних протезів. Надійне шифрування, механізми автентифікації та контролю доступу повинні бути впроваджені для захисту конфіденційності користувачів і запобігання несанкціонованому доступу або втручанню в роботу протеза.

Методи отримання даних, такі як міоелектричний прямий контроль і контроль механоміограми, підкреслюють важливість надійних програмних рішень для точної інтерпретації намірів користувача і перетворення їх у точні рухи протеза. Аналогічно, передача тактильних відчуттів і зворотного зв'язку підкреслює важливість програмного забезпечення в наданні користувачам реалістичних сенсорних відчуттів, що покращує їхню взаємодію з протезом.

Методи математичного моделювання дають цінну інформацію про рухи користувача і коактивацію м'язів, допомагаючи в розробці більш інтуїтивно зрозумілих і чутливих систем управління протезами. Крім

того, запропонована модель якості окреслює ключові характеристики, необхідні для забезпечення надійності, безпеки, адаптивності та інтероперабельності програмного забезпечення біонічних протезів, що в кінцевому підсумку підвищує задоволеність і безпеку користувачів.

Це дослідження підкреслює невід'ємну роль розробки програмного забезпечення у формуванні майбутнього технологій біонічного протезування. Постійно впроваджуючи інновації та вдосконалюючи програмні рішення, ми можемо ще більше розширити можливості людей з втраченою кінцівкою вести більш незалежне та повноцінне життя.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Bumbaširević M., Lesic A., Palibrk T., Milovanovic D., Zoka M., Kravić-Stevović T., Raspopovic S. The current state of bionic limbs from the surgeon's viewpoint. *EFORT Open Rev.* 2020. 5(2). P. 65–72. doi: 10.1302/2058-5241.5.180038. PMID: 32175092; PMCID: PMC7047902.
2. Abrams Z. A New Era for Bionic Limbs. *IEEE Pulse.* 2023. 14(1). P. 12–15. doi: 10.1109/MPULS.2023.3243313. PMID: 37028369.
3. Nascimento E., Nguyen-Duc A., Sundbø I., Conte T. Software engineering for artificial intelligence and machine learning software: A systematic literature review. arXiv preprint. 2020. doi: 10.48550/arXiv.2011.03751.
4. Hong-liu Y., Xing-san Q., Ling S. (2009) Analysis and comparison of intelligent control methods for computer-controlled artificial leg. *Rehabilitation Engineering & Assistive Technology (i-CREATE '09)* : Proceedings of the 3rd International Convention, New York, NY, USA, Article 22, 1–5. doi: 10.1145/1592700.1592725.
5. Menga G., Ghirardi M. Lower Limb Exoskeleton for Rehabilitation with Improved Postural Equilibrium. *Robotics.* 2018. 7(2). 28. doi: 10.3390/robotics7020028
6. Hardesty R. L., Boots M. T., Yakovenko S. et al. Computational evidence for nonlinear feedforward modulation of fusimotor drive to antagonistic co-contracting muscles. *Sci Rep.* 2020. 10. 10625. doi: 10.1038/s41598-020-67403-w.
7. Lotti N. et al. Adaptive Model-Based Myoelectric Control for a Soft Wearable Arm Exosuit: A New Generation of Wearable Robot Control. *IEEE Robotics & Automation Magazine.* 2020. Vol. 27(1). P. 43–53. doi: 10.1109/MRA.2019.2955669.
8. Camargo J., Bhakta K., Maldonado-Contreras J., Zhou S., Herrin K., Young A. OpenSim Model for Biomechanical Analysis with the Open-Source Bionic Leg. *Medical Robotics (ISMR)* : Proceedings of International Symposium, GA, USA, 2022, pp. 1–6. doi: 10.1109/ISMR48347.2022.9807551.
9. Aragon F. C., Huegel J. C., Vargas-Martinez A., Lozoya-Santos J. d. J., Ramirez-Mendoza R., Morales-Menendez R. Comparison between Classic Control Systems Techniques against Adaptive and Nonlinear Control Techniques in a Lower Limb Prostheses. *Control and Robotics Engineering (ICCRE)* : Proceedings of 4th International Conference, Nanjing, China, 2019, pp. 75–78. doi:10.1109/ICCRE.2019.8724210
10. Donaldson N., Brindley G. S. The Historical Foundations of Bionics. *Engineering.* 2016. P. 1–37. doi: 10.1002/9781118816028.ch1

#### REFERENCES:

1. Bumbaširević, M., Lesic, A., Palibrk, T., Milovanovic, D., Zoka, M., Kravić-Stevović, T., Raspopovic, S. (2020). The current state of bionic limbs from the surgeon's viewpoint. *EFORT Open Rev.*, 5(2), pp. 65–72. doi: 10.1302/2058-5241.5.180038. PMID: 32175092; PMCID: PMC7047902.
2. Abrams, Z. (2023). A New Era for Bionic Limbs. *IEEE Pulse*, 14(1), pp. 12–15. doi: 10.1109/MPULS.2023.3243313. PMID: 37028369.
3. Nascimento, E., Nguyen-Duc, A., Sundbø, I., Conte, T. (2020). Software engineering for artificial intelligence and machine learning software: A systematic literature review. arXiv preprint. doi: 10.48550/arXiv.2011.03751.
4. Hong-liu, Y., Xing-san, Q., Ling, S. (2009). Analysis and comparison of intelligent control methods for computer-controlled artificial leg. *Proceedings of the 3rd International Convention on Rehabilitation Engineering*

& Assistive Technology (i-CREATe '09). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 22, 1–5. doi: 10.1145/1592700.1592725.

5. Menga, G., Ghirardi, M. (2018). Lower Limb Exoskeleton for Rehabilitation with Improved Postural Equilibrium. *Robotics*, 7(2), 28. doi: 10.3390/robotics7020028

6. Hardesty, R. L., Boots, M. T., Yakovenko, S. et al. (2020). Computational evidence for nonlinear feedforward modulation of fusimotor drive to antagonistic co-contracting muscles. *Sci Rep*, 10, 10625. doi: 10.1038/s41598-020-67403-w.

7. Lotti, N. et al. (2020). Adaptive Model-Based Myoelectric Control for a Soft Wearable Arm Exosuit: A New Generation of Wearable Robot Control. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 27(1), pp. 43–53. doi: 10.1109/MRA.2019.2955669.

8. Camargo, J., Bhakta, K., Maldonado-Contreras, J., Zhou, S., Herrin, K., Young, A. (2022). OpenSim Model for Biomechanical Analysis with the Open-Source Bionic Leg. 2022 International Symposium on Medical Robotics (ISMR), GA, USA, pp. 1–6. doi: 10.1109/ISMR48347.2022.9807551.

9. Aragon, F. C., Huegel, J. C., Vargas-Martinez, A., Lozoya-Santos, J. d. J., Ramirez-Mendoza, R., Morales-Menendez, R. (2019). Comparison between Classic Control Systems Techniques against Adaptive and Nonlinear Control Techniques in a Lower Limb Prostheses. 2019 4th International Conference on Control and Robotics Engineering (ICCRE), Nanjing, China, pp. 75–78. doi:10.1109/ICCRE.2019.8724210

10. Donaldson, N., Brindley, G. S. (2016). The Historical Foundations of Bionics. *Engineering*, pp. 1–37. doi: 10.1002/9781118816028.ch1