

# РОБОТИЗОВАНИЙ ПРОГРАМНО-АПАРАТНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ДІАГНОСТИКИ ТА ЛІКУВАННЯ ЗАХВОРЮВАНЬ ХРЕБТА ЗА ДОПОМОГОЮ ТРАКЦІЙНОЇ ТЕРАПІЇ

Чорний К., Худецький І., Антонова-Рафі Ю.

Факультет біомедичної інженерії

Національний технічний університет України

“Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського”, Київ, Україна

chorny.kostia@gmail.com

**Реферат** — Був представлений роботизований програмно-апаратний комплекс для діагностики та лікування захворювань хребта за допомогою тракційної терапії. Тракційна терапія – це метод лікування і реабілітації захворювань хребта, який орієнтований на зняття локального спазму з певних відділів хребта, що значно пришвидшує процес відновлення тканин. Терапію виконують за допомогою або механічних, або електронно механічних технічних засобів. Механічні системи розтягнення хоч і прості і надійні, але потребують високої кваліфікації лікаря і не мають достатнього контролю за процесом лікування. Використання електронно-механічних систем зі зворотнім зв'язком вирішують проблему контролю процедури і додають гнучкості налаштування. Представлена система, за допомогою механічних засобів і електронного програмного керування, об'єднує точність та надійність машини і досвід та гнучкість людини. Наявність електронного керування дозволяє налаштовувати програми розтягнення в залежності від індивідуальних потреб пацієнта. Наприклад, можливо змінювати силу розтягнення за лінійним, імпульсним трикутним, імпульсним прямокутним, синусоїдальним та змішаним режимом. Крім того конструкція, що базується на чотирьох візках, дозволяє застосовувати різні програми розтягування для різних відділів хребта. Легкий в освоєнні та функціональний графічний інтерфейс дозволяє швидко виконувати налаштування процесу проведення процедури, контролювати її параметри, переглядати дані з датчиків в реальному часі. Система не потребує спеціальної підготовки для її використання, що сприятливо вплине на можливість її інтеграції. Використання індивідуальних тракційних алгоритмів та оригінальної конструкції тракційного стола дозволяє розробити унікальний підхід і лікуванні захворювань хребта, що підніме ефективність лікування на новий рівень та покращить якість життя пацієнтів.

**Ключові слова** — програмно-апаратний комплекс, тракційна терапія, захворювання хребта.

## І. Вступ

Захворювання опорно-рухового апарату є серйозною проблемою сучасного суспільства. За даними ВООЗ, сидячий спосіб життя у високорозвинених, а тепер і в країнах, що розвиваються, призводить до того, що майже 80 % населення страждають від захворювань такого типу з різним ступенем тяжкості [1]. Захворювання опорно-рухового апарату є третім за поширеністю після серцево-судинних і онкологічних захворювань. Серед них – дегенеративно-дистрофічні ураження хребетно-моторних сегментів, спазми, ураження міжхребцевих дисків, викривлення хребта тощо. Під час ходьби та сидіння, більша частина навантаження приходить на хребет, що призводить до ряду захворювань, пов'язаних з компресією та перевантаженням його відділів [2].

Одним з методів лікування та реабілітації при таких захворюваннях є тракційна терапія. Цей метод передбачає розтягнення хребта або всього тіла з певною силою для зняття напруги та деформації хребта, усунення симптомів захворювання та поліпшення умов для відновлення тканин після травми. [3, 4, 5].

Тракційна терапія проводиться лікарем-вертебрологом або мануальним терапевтом вручну або за допомогою технічних засобів в жорстко контрольованих умовах. При неправильному виконанні процедури можна нанести шкоду здоров'ю пацієнта, тому, зазвичай, процедура проводиться поступово, з послідовною зміною режимів, для точного контролю реакції.

У сучасній практиці використовують тракційну терапію за допомогою механічних засобів. Зазвичай вони представлені горизонталь-

ним столом, що укомплектований набором блоків, тросів та ваг. Пацієнт фіксується на столі еластичними смугами і силу розтягнення прикладають до певної ділянки хребта підвищуючи до тросів ваги певної величини. Але такі системи мають кілька недоліків:

- низька ступінь налаштування під особисті потреби пацієнта;
- немає можливості використання динамічних програм розтягнення;
- зворотній зв'язок відбувається через лікаря;
- відсутність інструментів для контролю процедури.

Таким чином, ці недоліки можна усунути шляхом впровадження електронного та програмного контролю за процедурою, а також надання лікарю максимальної кількості інформації під час процедури та можливості її точної настройки.

Зараз на ринку існують комплекси від різних виробників і з різними функціями. Серед них є системи як з простим механічним приводом, так і з електронним управлінням. Також є пристрої для мокрого розтягування, які представлені у вигляді ванни та підтримують різні температурні режими, стимуляцію з вібраціями та водяними струменями (рис. 1).

Представлений комплекс має трохи складніший механічний дизайн, який дозволяє створювати більш складні програми розтягування та має більшу гнучкість налаштувань.

Метою даної роботи є розробка проекту роботизованого програмно-апаратного комплексу для діагностики та лікування захворювань хребта з використанням тракційної терапії, а також дослідження процедури проведення терапевтичних процедур з використанням цього комплексу на імітованих зразках.

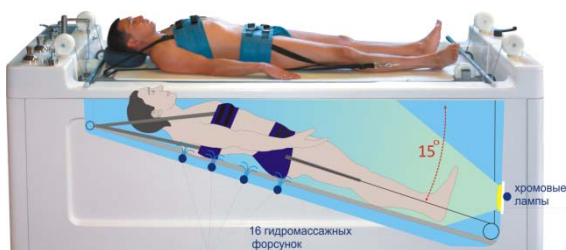


Рис. 1. Тракційна ванна для вологого розтягування

## II. Розробка системи

Для досягнення поставленої мети необхідно розробити систему, яка буде складатися з трьох основних компонентів: механічного, електронного та програмного.

## III. Механічний компонент

Механічна частина – це стіл, який повинен бути зроблений з міцних, нетоксичних та недорогих матеріалів, з розрахунку на вагу дорослої людини (до 150 кг) та її зріст (до 2100x600 мм). Стіл повинен бути встановлений горизонтально на підлозі на 4 регульовані ніжки. На робочій поверхні столу на направляючі будуть монтуватися чотири візки, привідні шурупи та їх кріплення, мотори змінного струму та шестерні. Рух візків буде здійснюватися шляхом обертання приводних гвинтів двигунами, які за допомогою гайки, закріпленій в візку, перетворюватимуть обертальний рух гвинта у поступальний рух візка. Контроль швидкості візка та сили, що застосовується до пацієнта, повинен виконуватися за допомогою тензодатчиків, а також контролем швидкості обертання двигунів. Також можна визначити силу розтягування, вимірюючи струм, що споживається двигунами.

Візки – це рухомі частини стола, на яких буде лежати пацієнт. Кожен візок має бути обладнаний набором еластичних поясів, якими пацієнт прикріплюється до візка. Форма самих візків повинна бути ергономічною і зручною для довготривалої процедури. Матеріал покриття повинен бути м'яким та гіпоалергенним. Також, візки будуть оснащені датчиками для отримання параметрів пацієнта під час процедури.

Загальний вигляд механічної частини показаний на рис. 2, 3.

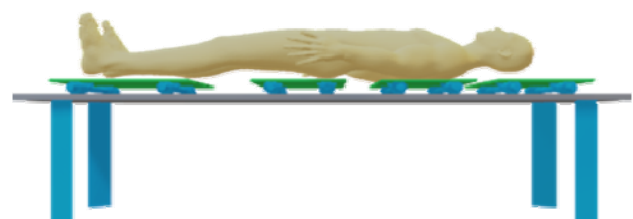


Рис. 2. Тракційний стіл. Вигляд збоку

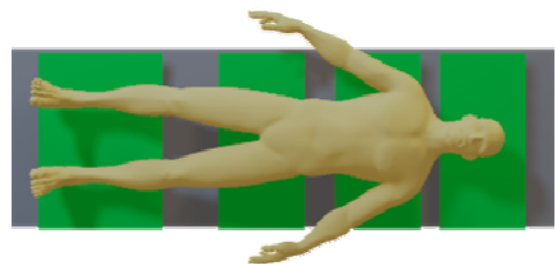


Рис. 3. Тракційний стіл. Вигляд зверху

#### IV. Електронний компонент

Електронний блок управління буде складатись з мікрокомп'ютера або мікроконтролера, який буде працювати з двигунами та датчиками (рис. 4). Команди для двигунів та дані від датчиків будуть передаватися в комп'ютер за допомогою бездротового зв'язку. В якості мікроконтролера можна використати будь-яку модель популярних і доступних пристроїв: Arduino, RaspberryPi, Amperka. Для цих мікроконтролерів на ринку є багато готових модулів для підключення серводвигунів, датчиків, елементів керування та інтерфейсу. Є також моделі з вбудованими бездротовими передавачами, або такі передавачі можуть бути встановлені як окремі модулі. Крім того, можна встановити дисплей, на якому можна налаштувати відображення основної інформації про виконання поточної процедури.

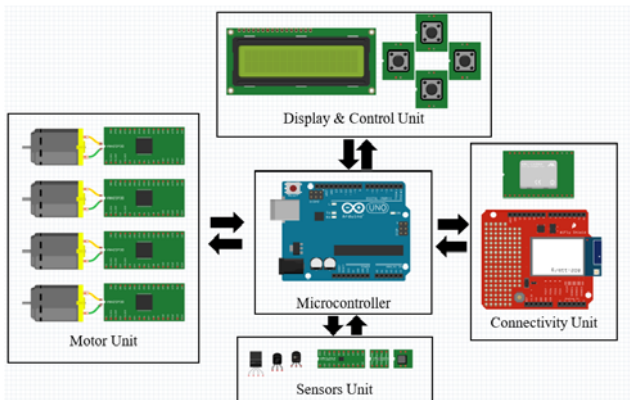


Рис. 4. Електронний блок керування на основі Arduino

#### V. Програмний компонент

Комп'ютерна програма керуватиме механічною та електронною частинами. Початкова мета – створити програму для операційної системи Microsoft Windows з наступними функціями:

- Відображення вичерпної інформації про стан механізму та електронної частини: стан з'єднання з пристроєм, положення візків, швидкість візків, сила розтягу, довжина розтягування, дані від зовнішніх датчиків;
- Управління електромеханічною частиною: програмування рухів візків, режими роботи, сила розтягування та інші параметри;
- Захист пацієнта від перевантажень: обмеження граничної сили розтягування, умови аварійного вимкнення, обмеження часу, автоматичне вимкнення у випадку втрати зв'язку з програмою керування;

- Накопичення інформації про виконані процедури та вимірювання для подальшої обробки;
- Можливість точно налаштувати будь-який етап процедури, змінити її параметри та алгоритм.

Також варто звернути увагу на розробку графічного інтерфейсу. Програмне забезпечення має бути розроблено для роботи з лікарями без спеціальної підготовки. Інтерфейс має бути доступним і зрозумілим, не перевантаженим, але одночасно відображати всю необхідну інформацію на одному екрані під час проведення процедури. Крім того, необхідно додати обмежувальні інструменти та перевірку даних, щоб виключити введення невірних параметрів. Лікар повинен мати можливість регулювати не тільки статичну силу розтягування, але також змінювати її у часі у вигляді двовимірних діаграм, встановлювати тривалість і циклічність розтягування. На цьому етапі дуже важливий високий рівень налаштувань, оскільки автоматизовані алгоритми ще не розроблені, і лікар повинен мати повний контроль над процедурою.

Робота всіх трьох складових позбавляє системи серйозних недоліків, забезпечує стабільну та безпечну роботу з комплексом як лікаря, так і пацієнта. Також за допомогою надійної механіки процедура буде повторювана, частково виключаючи людський фактор, і за допомогою датчиків можна буде спостерігати об'єктивний стан пацієнта під час лікування.

#### VI. Алгоритми обробки

Наявність датчиків дозволяє вимірювати такі основні параметри процедури як сила розтягування, відстань, до якої була розтягнута певна частина хребта, та час, протягом якого відбулося розтягування. Використовуючи ці параметри, можна побудувати відношення, що відображає відстань розтягування залежно від часу, при використанні різних сил розтягнення.

На рис. 5 видно залежність довжини тієї чи іншої частини хребта, яка піддається розтягуванню за часом, під час застосування різної сили розтягування, яка позначається пунктирною лінією. Залежність довжини розтягування від часу на певній ділянці графіка можна описати за допомогою рівняння (1),

$$L(t) = \frac{F}{r \left( 1 - e^{\frac{t}{P}} \right)} \quad (1)$$

де  $L(t)$  – довжина розтягування;  $F$  – сила роз-

тягування (пунктирна лінія на рис. 5);  $r$  – опір тканин, який визначає максимальну ступінь розтягнення тканин при застосуванні певної сили;  $p$  – еластичність тканин визначає, наскільки швидко тканина набуває нової форми.

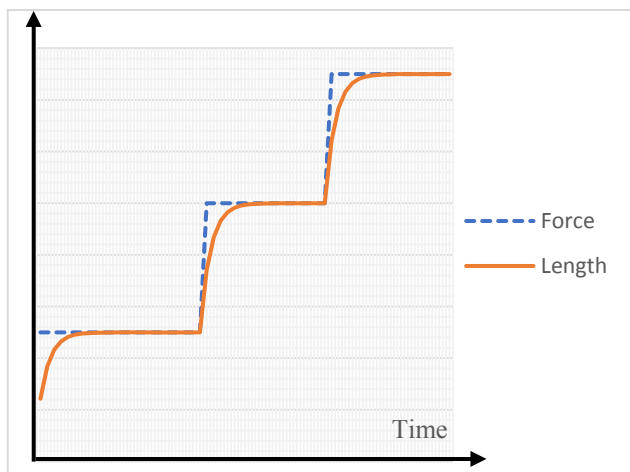


Рис. 5. Зміна довжини розтягнутого хребта в часі при застосуванні різної сили розтягування

Використовуючи рис. 5, можливо розрахувати коефіцієнти еластичності та опору тканин при різних значеннях ступеня розтягування, а потім використати ці параметри для визначення нормального або патологічного стану пацієнта та динаміки цих параметрів протягом курсу лікування.

Також, як загальний критерій для контролю розтягування, можна використовувати загальну характеристику розтягнення, яку можна розрахувати за допомогою рівняння (2).

$$R = \int L(t)dt \quad (2)$$

Критерій  $R$  допоможе системі проаналізувати ступінь розтягнення та еластичність тканин для точного контролю якості процедури. Збільшуючи значення критерію, площа фігури, що описується функцією  $L(t)$ , збільшиться, що вказує на збільшення еластичності тканини та зменшення опору. При зниженні ми будемо спостерігати зворотний ефект: еластичність тканини зменшилася, а опір збільшився.

Щоб отримати значення коефіцієнтів, необхідно провести випробування на експериментальних зразках хребта. Модель буде виготовлена з матеріалів аналогічних справжнім тканинам, щоб визначити параметри розтягування як можна точніше для подальшого калібрування пристрою. Потім, отримавши коефіцієнти на моделі, необхідно розрахувати головні параметри калібрування: основна швид-

кість візка, максимальна межа міцності на розрив, максимальна тривалість процедури, максимальна довжина розтягнення.

Також необхідно визначити параметри різних режимів роботи пристрою:

- Лінійне розтягування,
- Імпульсне розтягування за трикутним профілем,
- Імпульсне розтягування за прямокутним профілем,
- Синусоїдне розтягування,
- Комбіноване.

Лінійне розтягування можна розділити на два типи: статичне і динамічне. При статичному розтягуванні сила розтягування не змінюється з часом. Оскільки довжина хребта збільшується з розтягуванням хребта, сила розтягнення зменшується. Щоб запобігти цьому, програмне забезпечення системи збереже постійне значення сили розтягування за рахунок поступового руху візків. При динамічному розтягуванні сила, яка застосовується до пацієнта, збільшується лінійно (рис. 6). Основним параметром тут є швидкість зміни сили розтягування та її граничні умови.

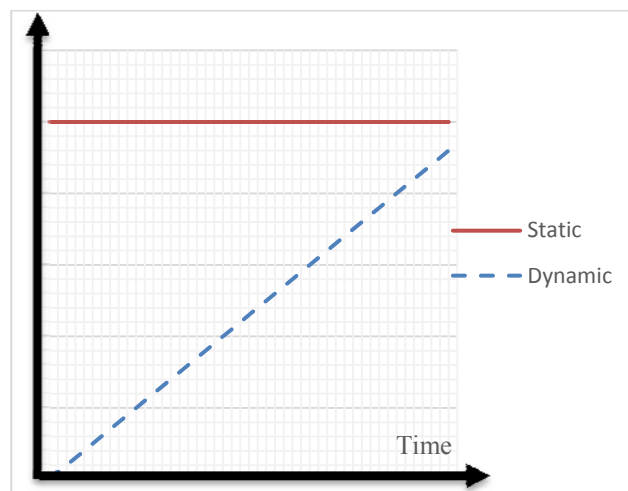


Рис. 6. Статичний та динамічний режими роботи

При імпульсному розтягуванні з трикутним профілем сила розтягування періодично збільшується лінійно і зменшується (рис. 7). Основними параметрами цього режиму є максимальна сила розтягування, мінімальна сила розтягування, тривалість періоду розтягування, робочий цикл, кількість періодів. Цей режим більш жорсткий у порівнянні з попереднім, але це дасть змогу швидше досягти потрібного результату при використанні меншої максимальної сили розтягування.



Імпульсний режим розтягування з прямокутним профілем схожий на трикутний профіль, але його основними параметрами є також мінімальна і максимальна сила розтягування, робочий цикл та кількість періодів (рис. 7).

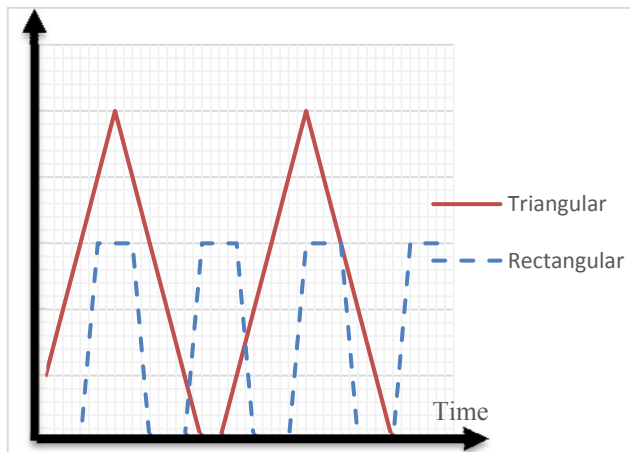


Рис. 7. Трикутний та прямокутний режими роботи

Під час роботи в синусоїдальному режимі сила розтягу змінюється відповідно до синусоїдального закону (рис. 8). Для роботи в цьому режимі необхідно визначити амплітуду, частоту, а також вертикальний зсув не менше половини амплітуди. Синусоїдальний режим дуже гладко змінює силу розтягування, тому його можна використовувати в якості м'якого режиму.

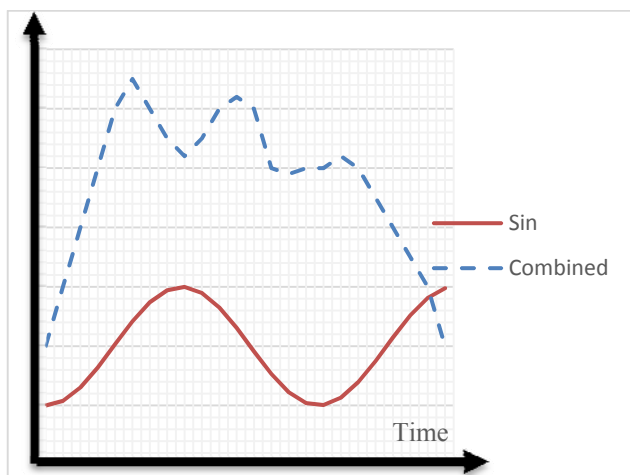


Рис. 8. Синусоїдальний та змішаний режим роботи

У комбінованому режимі лікар може встановлювати довільні зміни сили розтягнення (рис. 8). Він може вибрати індивідуальну програму розтягування для будь-яких потреб та будь-якого пацієнта. У цьому режимі також необхідно забезпечити обмеження, які не дозволяють змінювати силу натягу надто швидко, щоб запобігти пошкодженню тканин.

## VII. Висновок

У даній роботі проаналізовано актуальність розробки програмно-апаратних систем для лікування захворювань хребта шляхом тракційної терапії. Згідно з завданнями була розроблена система, що складається з механічної, електронної та програмної частин. Оригінальна конструкція тракційного стола дозволяє лікарю розтягувати певні ділянки хребта або все тіло, залежно від потреб пацієнта. Електронна частина забезпечена точними приводами та датчиками, які забезпечують не тільки точність та повторюваність процедури розтягнення, але також захищають пацієнта під час надзвичайних ситуацій. Програмне забезпечення має функціонувати як мозок всієї системи та надавати оператору повну інформацію про поточну процедуру, бути в змозі гнучко адаптуватись до будь-яких потреб пацієнта, а також забезпечити безпеку пацієнта під час процедури.

Цей комплекс дозволяє провести дослідження впливу розтягнення хребта на параметри опору та еластичності тканин. Ці дані можуть бути використані для оцінки якості процедури, діагностики захворювань, динамічного моніторингу стану пацієнта.

Використання різних режимів роботи забезпечить необхідний ефект, а також дозволить лікарю індивідуально вибирати лікувально-реабілітаційні програми для кожного пацієнта.

У майбутньому планується розробити алгоритмічну частину проекту для додавання програм автоматизованої терапії, які будуть не тільки оптимально налаштовуватися для кожного пацієнта, але й будуть доповнювати лікаря, покращуючи якість лікування.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] "World Health Statistics 2016: Monitoring health for the SDGs", World Health Organization. Geneva, pp. 10-11, 2016.
  - [2] N. A. Quraishi, Z. L. Gokaslan, S. Boriani, "The surgical management of metastatic epidural compression of the spinal cord", The Bone & Joint Journal, 2010.
  - [3] Saunders H., Duane M. S., "Use of Spinal Traction in the Treatment of Neck and Back Conditions" Clinical Orthopaedics & Related Research
  - [4] Aristotelis S. Filippidis., M. Yashar Kalani., Nicholas Theodore, Harold L. Rekate, "Spinal cord traction, vascular compromise, hypoxia, and metabolic derangements in the pathophysiology of tethered cord syndrome" Journal of Neurosurgery, 2010.
- Bermans J. Iskandar, Benjamin B. Fulmer, Mark N. Hadley, W. Jerry Oakes, "Congenital tethered spinal cord syndrome in adults", Journal of Neurosurgery.

# РОБОТИЗИРОВАННЫЙ ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ И ЛЕЧЕНИЯ ЗАБОЛЕВАНИЙ ПОЗВОНОЧНИКА С ПОМОЩЬЮ ТРАКЦИОННОЙ ТЕРАПИИ

**Чёрный К., Худецкий И., Антонова-Рафи Ю.**

chorny.kostia@gmail.com

Факультет биомедицинской инженерии

Национальный технический университет Украины

“Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского”

Киев, Украина

**Реферат** — Был представлен роботизированный программно-аппаратный комплекс для диагностики и лечения заболеваний позвоночника с помощью тракционной терапии. Тракционная терапия — это метод лечения и реабилитации заболеваний позвоночника, который ориентирован на снятие локального спазма с определенных отделов позвоночника, что значительно ускоряет процесс восстановления тканей. Терапию выполняют с помощью механических или электронно-механических технических средств. Механические системы растяжения хоть простые и надежные, но требуют высокой квалификации врача и не имеют достаточного контроля над процессом лечения. Использование электронно-механических систем с обратной связью решают проблему контроля процедуры и добавляют гибкости настройки. Представленная система, с помощью механических средств и электронного программного управления, объединяет точность и надежность машины и опыт, гибкость человека. Наличие электронного управления позволяет настраивать программы растяжения в зависимости от индивидуальных потребностей пациента. Например, возможно изменять силу растяжения по линейному, импульсному треугольному, импульсному прямоугольному, синусоидальному и смешанному режиму. Кроме того, конструкция, которая основана на четырех тележках, позволяет применять различные программы растяжения для различных отделов позвоночника. Легкий в освоении и функциональный графический интерфейс позволяет быстро выполнять настройки процесса проведения процедуры, контролировать ее параметры, просматривать данные с датчиков в реальном времени. Система не требует специальной подготовки для ее использования, что благоприятно повлияет на возможности ее интеграции. Использование индивидуальных тракционных алгоритмов и оригинальной конструкции тракционного стола позволяет разработать уникальный подход для лечения заболеваний позвоночника, поднимет эффективность лечения на новый уровень и улучшит качество жизни пациентов.

**Ключевые слова** — программно-аппаратный комплекс, тракционная терапия, заболевания позвоночника.

# ROBOTIC HARDWARE AND SOFTWARE SYSTEM FOR DIAGNOSTIC AND TREATMENT OF SPINE DISEASES USING TRACTION THERAPY

*Chornyi K., Khudetskyy I., Antonova-Rafi Y.*

chorny.kostia@gmail.com

Faculty of Biomedical Engineering

National Technical University of Ukraine

“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

Kyiv, Ukraine

**Abstract** — A robotic software and hardware system for diagnosing and treating spine diseases using traction therapy was presented. Traction therapy is a method of treatment and rehabilitation of spine diseases, which focuses on the removal of local spasm from certain parts of the spine, which greatly speeds up the process of tissue repair. The therapy is performed with the help of mechanical or electronic mechanical devices. Mechanical stretching systems are simple and reliable but require high qualification of the doctor and do not have sufficient control over the treatment process. The use of electronic-mechanical feedback systems solves the problem of controlling the procedure and adds flexible settings. Presented system, with the mechanical devices and electronic program management, combines the accuracy and reliability of the machine and the experience and flexibility of the person. The presence of electronic control allows you to customize the stretching program, depending on the individual needs of the patient. For example, it is possible to change the tensile force in linear, impulse triangular, impulse rectangular, sinusoidal and mixed modes. In addition, the construction, which is based on four trolleys, allows to use various stretching programs for different parts of the spine. Easy-to-learn and functional graphical interface allows you to quickly perform settings of the procedure, monitor its parameters, view data from sensors in real time. The system does not require special training for its use, which will favorably affect the possibilities of its integration. The use of individual traction algorithms and the original design of the traction table allows to develop a unique approach for the treatment of spine diseases, raise the effectiveness of treatment to a new level and improve the quality of patient's life.

**Keywords** — hardware and software system; traction therapy, spine diseases