

Маркова Є.Д.Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Черепанська І.Ю.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АЛГОРИТМІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ СЕРЦЕВО-ЛЕГЕНЕВОЇ РЕАНІМАЦІЇ

Стаття присвячена проблемі автоматизації оцінювання ефективності та якості дій непрофесійних рятувальників при виконанні серцево-легеневої реанімації безпосередньо на місці пригод. Оцінка правильності реанімаційних дій рятувальника у режимі реального часу необхідна для вчасного коригування виконуваної процедури серцево-легеневої реанімації (СЛР) та підвищення шансів постраждалих на відновлення життєдіяльності. Обмежений час на порятунок та критичні умови проведення реанімаційних заходів значно погіршують стан непрофесійного рятувальника, тому для якісного виконання реанімації, він потребує зворотного зв'язку щодо правильності його дій та підказок щодо виконання реанімації згідно із нормативними медичними документами.

У статті наведено опис алгоритмічного забезпечення раніше розробленої автоматизованої системи оцінювання якості та ефективності серцево-легеневої реанімації. Основою запропонованого алгоритмічного забезпечення є розроблена інтегральна оцінка якості, яка дозволяє комплексно оцінювати правильність та ефективність дій непрофесійних рятувальників за множиною параметрів СЛР, що регламентуються нормативними медичними документами, та показниками ознак життя людини. Алгоритмічне забезпечення розроблено з огляду на несприятливі морально-психологічні завади та значну втомлюваність, що мають високу ймовірність виникнення у критичних ситуаціях та призводити до помилок у діях непрофесійних рятувальників. Оцінка реанімаційних дій, отримана у результаті роботи алгоритму, може бути надана рятувальнику та використана у якості зворотного зв'язку для коригування виконання процедури СЛР. Алгоритмічне забезпечення є інтегральним середовищем, у якому об'єднано множину спеціальних технічних засобів у складі АСЯ СЛР. АСЯ СЛР може бути використана непрофесійними рятувальниками безпосередньо на місці пригод до прибуття медичних працівників, що значно підвищує шанси постраждалих на виживання.

Ключові слова: алгоритмічне забезпечення, серцево-легенева реанімація, інтегральна оцінка якості, автоматизована система, перша допомога.

Постановка проблеми. При розробці сучасних систем автоматизованого оцінювання правильності та ефективності дій непрофесійних рятувальників при серцево-легеневій реанімації (СЛР) постраждалих в позалікарняних умовах безпосередньо на місці пригод до прибуття медичних працівників, особлива увага приділяється підвищенню зручності їх використання, точності та швидкодії. Одним із перспективних і актуальних шляхів підвищення зручності використання, точності та швидкодії таких систем, у тому числі відомої автоматизованої системи оцінювання якості та ефективності серцево-

легеневої реанімації (АСЯ СЛР) [1], на сьогодні, є застосування алгоритмічних методів обробки сигналів та обчислення інтегральної оцінки якості СЛР, а також розробка інтуїтивно зрозумілого інтерфейсу користувача. Застосування вказаного дозволяє здійснювати корекцію дій непрофесійних рятувальників в режимі реального часу, без участі кваліфікованих медичних працівників відповідно до вимог нормативних медичних документів безпосередньо під час проведення СЛР постраждалих.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відома низка наукових праць [2–7], в яких опи-

сано теоретичні основи і досліджено засоби та алгоритми корекції дій рятувальників під час проведення СЛР постраждалих.

Так в роботі під назвою «Closed-loop machine-controlled CPR system optimises haemodynamics during prolonged CPR» за авторством Себастьяна П. та ін. [2] розглядається система серцево-легеневої реанімації із замкнутим циклом. Основою роботи системи є алгоритми машинного навчання. Проте, наведене в роботі потребує додаткових досліджень, адже на думку розробників, машинне навчання може призвести до втручань, які неможливо раціоналізувати з точки зору сучасних наукових знань.

В роботі під назвою «Automatic Detection of Ventilations During Mechanical Cardiopulmonary Resuscitation» за авторством Юрегуїбеїта Кс. та ін. [3] розглядається метод точного виявлення вентиляції легень постраждалого при СЛР за допомогою імпедансу при механічній компресії грудної клітки.

В роботі під назвою «A smartphone application to provide real-time cardiopulmonary resuscitation quality feedback» за авторством Стумпф Е. та ін. [4] приводиться додаток для смартфона для забезпечення аудіовізуального та тактильного зворотного зв'язку у режимі реального часу щодо якості СЛР. Розробники спираються на дослідження, які продемонстрували, що аудіовізуальний зворотний зв'язок у режимі реального часу покращує якість СЛР. Проте наведене має дещо декларативний характер та потребує доопрацювання, адже є пілотним дослідженням, проведеним з метою демонстрації доцільності розробки системи оцінки якості СЛР.

В роботі під назвою «Automated cardiopulmonary resuscitation (ACR): enhancing life-saving interventions during cardiac arrest» за авторством Мухтіар Н. та ін. [5] описано систему автоматизованої СЛР та наводяться результати її успішного тестування. Проте результати роботи [5] орієнтовані на використання тільки медичними працівниками у стаціонарних умовах лікарень і не передбачають можливості використання непрофесійними рятувальниками безпосередньо на місці пригоди.

В роботі під назвою «Design and evaluation of CPR emergency equipment for non-professionals» за авторством Сіе Дж. [6] розглядаються обладнання для екстреної СЛР з функцією мультисенсорного зворотного зв'язку для надання допомоги рятувальникам у виконанні СЛР за допомогою візуальної, слухової та тактильної взаємодії. Керу-

вання пристроєм здійснюється з використанням платформи Arduino. Зв'язок реалізовано за допомогою ESP-MESH та мережевого протоколу на основі WiFi.

Проте недоліком представленої в роботі [6] розробки є обмеженість параметрів СЛР та неточність визначення показників ознак життя постраждалого. Очевидно, що це вимагає додаткових досліджень в даному напрямку.

В роботі під назвою «Dispatcher-Assisted cardiopulmonary resuscitation – influence on return of spontaneous circulation and short-term survival» за авторством Ніколовскі С. та ін. [7] розглядається метод диспетчерської допомоги непрофесійним рятувальникам під час СЛР пацієнтів із зупинкою серця поза лікарнею ЗСЛ. Показано, що допомога та корекція дій рятувальників має позитивний вплив на досягнення відновлення спонтанного кровообігу. Обмеженнями щодо практичного застосування результатів роботи [7] є необхідність попередньої високоякісної підготовки професійних диспетчерів, що передбачає довготривалих витрат часу.

Отже проблема автоматизованої корекції дій непрофесійних рятувальників під час проведення СЛР постраждалих безпосередньо на місці пригоди до прибуття медичних працівників ще не повністю вирішена. Вказане значно зменшує шанси постраждалих на виживання у несприятливих позалікарняних умовах. СЛР постраждалих на місці пригоди, як правило, проводиться непрофесійними рятувальниками.

Очевидно, що такі умови є критичними та несприятливими як для постраждалого так і для рятувальника. Адже вони супроводжуються низкою морально-психологічних завад та швидкою втомлюваністю, що можуть викликати помилки в діях рятувальників. Тому, необхідно враховувати ці особливості при розробці алгоритмічного забезпечення та інтерфейсу систем автоматизованого оцінювання правильності та ефективності СЛР, що орієнтовані власне на непрофесійних рятувальників.

Постановка завдання. Метою даного дослідження є розробка алгоритмічного забезпечення визначення інтегральної оцінки якості СЛР та інтуїтивно зрозумілого інтерфейсу користувача АСЯ СЛР, що забезпечить автоматизовану корекцію дій непрофесійних рятувальників до прибуття медичних працівників та підвищить шанси постраждалих на виживання безпосередньо на місці пригоди.

Задачі дослідження:

1. Визначити множину показників правильності та ефективності дій рятувальників при СЛР,

які формують зміст інтегральної оцінки якості СЛР у цілому.

2. Розробити алгоритмічне забезпечення АСЯ СЛР для оцінки якості СЛР в автоматизованому режимі.

3. Розробити інтуїтивно зрозумілий інтерфейс для сповіщення непрофесійних рятувальників про правильність та ефективність їх дій при СЛР, а також за необхідності корегування цих дій.

Виклад основного матеріалу дослідження. АСЯ СЛР є розвитком результатів досліджень представлених в роботі [1] щодо побудови систем автоматизованого оцінювання правильності та ефективності дій непрофесійних рятувальників при СЛР постраждалих в позалікарняних умовах безпосередньо на місці пригоди до прибуття медичних працівників. В АСЯ СЛР для оцінки правильності та ефективності дій непрофесійних рятувальників при СЛР використовується комплексний підхід.

Вибір методів та засобів для автоматизованого визначення показників правильності СЛР та її ефективності шляхом виявлення ознак життя постраждалих, здійснювався з огляду на їх доступність та можливість практичної реалізації.

Для оцінки якості СЛР у цілому використовувався порівняльний аналіз, який дозволяє здійснити оцінку за декількома параметрами. Зокрема визначається *сатурація SpO_2 крові та пульс* постраждалого; *параметри одинарної компресії*, зокрема прискорення a_z по вертикальній осі та зміщення по вертикальній осі l_z , яке виражає *глибину S продавлення грудної клітки; частота фкомпресій*.

АСЯ СЛР являє собою складну багаторівневу систему у якій інтегровані різні за своїми функціональними властивостями та призначенням технічні засоби автоматизації (ТЗА). Інтеграція ТЗА у АСЯ СЛР здійснюється на основі спеціального розробленого алгоритмічного забезпечення, блок-схема якого наведена на рис. 1.

Реалізація алгоритму здійснюється за 28 кроків у відповідних блоках. Так блок 1 – це початок алгоритму.

У блоці 2 здійснюється опитування високоточного триосьового MEMS-акселерометра високої роздільної здатності, наприклад ADXL345 виробництва Analog Device (США), який видає вимірювальний сигнал у вигляді 16-розрядного цифрового коду через цифрові інтерфейси SPI / I2C. MEMS-акселерометр використовується для високоточного вимірювання параметрів компресій

грудної клітки постраждалого шляхом вимірювання величини прискорення по трьох осях.

Отримані вимірювальні дані перевіряються у блоці 3 на відповідність умові щодо необхідної сили компресії, яка є ефективною. З огляду на те, що сила компресії корелює із перевантаженням, яке виникає в момент натискання на грудну клітку постраждалого вона визначається як прискорення вільного падіння a чутливого елементу акселерометру та повинна перевищувати $1,5 \text{ м/с}^2$ або $0,153 \text{ g}$ для дорослої людини.

Якщо ця умова не виконується, то сила компресії вважається недостатньою, а СЛР неякісною, про що у блоці 4 формується повідомлення рятувальнику шляхом підсвічення червоного світлодіоду (блоки 23–24). В іншому випадку дії рятувальника щодо сили компресії вважаються правильними та ефективними і йому рекомендується продовжувати реанімацію у цьому ж темпі. При цьому у блоці 5 фіксується час початку та кінця компресії.

У блоці 6 визначається глибина S виконуваної рятувальником компресії, як добуток величини прискорення вільного падіння a чутливого елементу акселерометра, при натисканні на грудну клітку постраждалого, на час t руху грудної клітки відносно вертикальної Z осі (рис. 2) при компресії: $s = \frac{1}{2}at^2$.

Отримані значення глибини S виконуваної компресії грудної клітки рятувальником перевіряються у блоці 7 на відповідність гранично допустимим. Так необхідна глибина прогину грудної клітки постраждалого при компресії повинна становити 5–6 см для дорослої людини.

Величина похибки визначення глибини S виконуваної компресії грудної клітки АСЯ СЛР не перевищує $\pm 0,5$ см, що задовольняє вимоги нормативних медичних документів [8, 9]. Якщо глибина виконуваної компресії S менше ніжнього гранично допустимого значення і становить $S < (4,5 \pm 0,5)$ см, то глибина компресія вважається недостатньою, а СЛР неякісною.

Інформація про це надається рятувальнику шляхом підсвічення червоного світлодіоду (блоки 23–24). В іншому випадку дії рятувальника щодо глибини компресії вважаються правильними та ефективними і йому рекомендується продовжувати реанімацію таким же чином. При цьому у блоці 9 фіксується час початку та кінця одинарної компресії.

Для визначення частоти ϕ виконання компресій, яка повинна становити 100–120 натискань у хвилину, відмітки часу початку та кінця

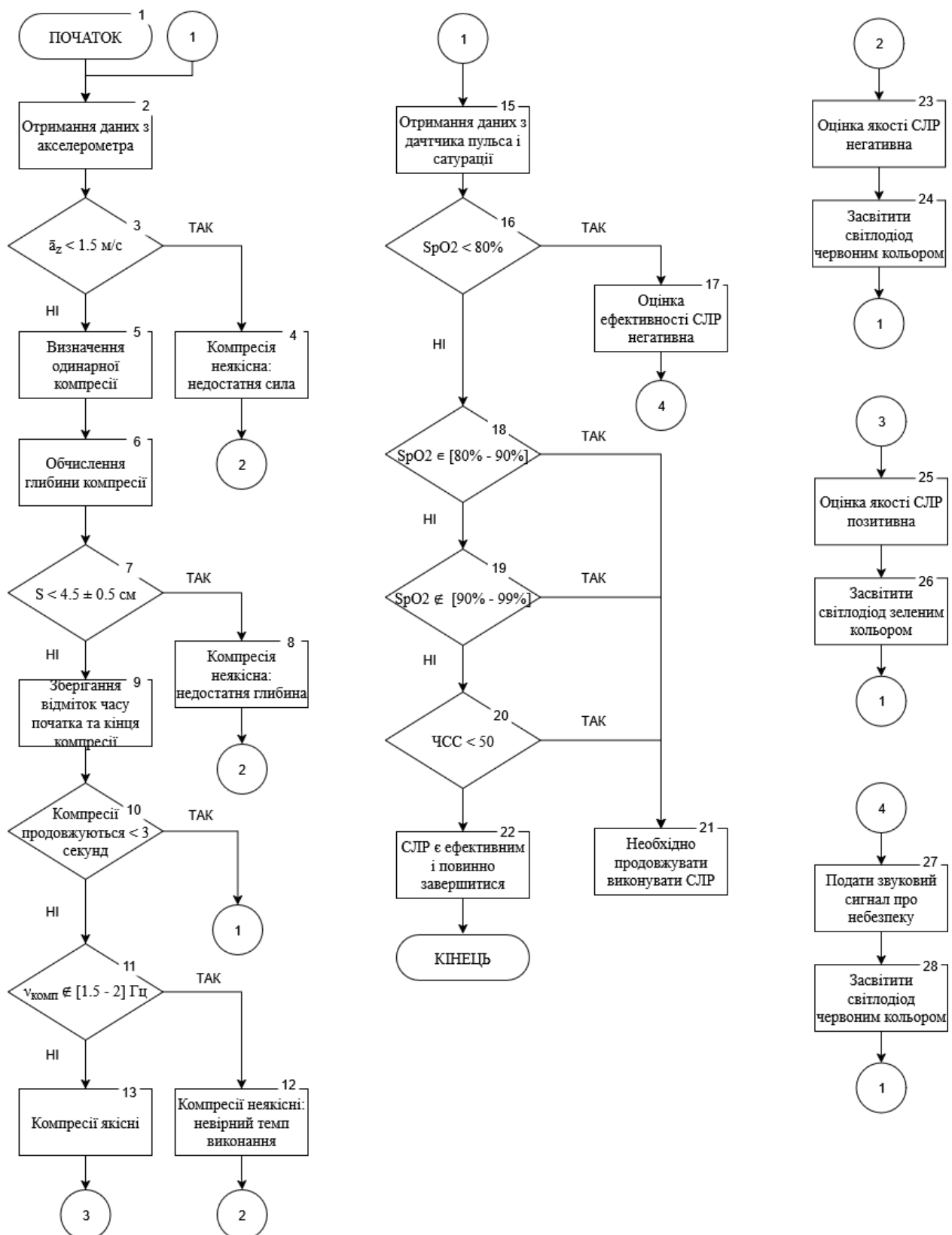


Рис. 1. Блок-схема алгоритмічного забезпечення АСЯ СЛР

компресій відстежуються протягом 3 секунд паралельно із оцінкою СЛР по інших параметрах (блок 10).

Після накопичення достатньої кількості відміток часу, у блоці 11 визначається частота ϕ виконання компресій СЛР. Якщо частота натискання

на грудну клітку становить близько 1,5–2 Гц, то частота ϕ виконання компресій вважається достатньою (блок 13) і рятувальнику рекомендується продовжувати реанімацію таким же чином. Інформація про це передається рятувальнику у вигляді підсвіченого зеленим кольором світлодіоду (блоки 25–26). В іншому випадку рятувальнику рекомендується збільшити частоту компресій, шляхом підсвічення червоним кольором відповідного світлодіоду (блоки 23–24).

Одночасно АСЯ СЛР здійснюється оцінка таких показників ознаки життя постраждалого як поява серцебиття та самостійного дихання. Для цього у блоках 15–22 обробляються вимірювані дані із датчиків сатурації крові та пульсу. Так у блоці 16 перевіряється сатурація SpO_2 .

Якщо ступінь насиченості крові постраждалого киснем, або сатурація SpO_2 , яка визначається відсотках, становить менше 80%, то існує велика загроза життю постраждалого. Це вказує на те, що реанімаційні заходи або не виконуються зовсім, або є вкрай неефективними. У такому випадку знижується оцінка якості виконання СЛР та підсвічується червоний світлодіод (блоки 23–24).

Якщо сатурація SpO_2 становить 80%, то це відповідає сатурації SpO_2 крові постраждалого, щодо якого тільки почали проводити реанімаційні заходи [9].

Якщо значення сатурації SpO_2 більше 80% то у блоці 18 перевіряється, чи знаходиться це значення у межах гранично допустимих 80%–90%. Якщо дана умова виконується, то рятувальнику необхідно продовжувати виконувати СЛР допоки ступінь насиченості крові постраждалого киснем не збільшиться і значення сатурації SpO_2 не буде знаходитись в межах 90–99% (блок 19), що відповідає значенню сатурації крові людини яка починає проявляти ознаки життя, або повноцінну життєдіяльність [9]. Оцінка якості процедури СЛР до моменту виконання умови блоку 19 не змінюється (блок 21).

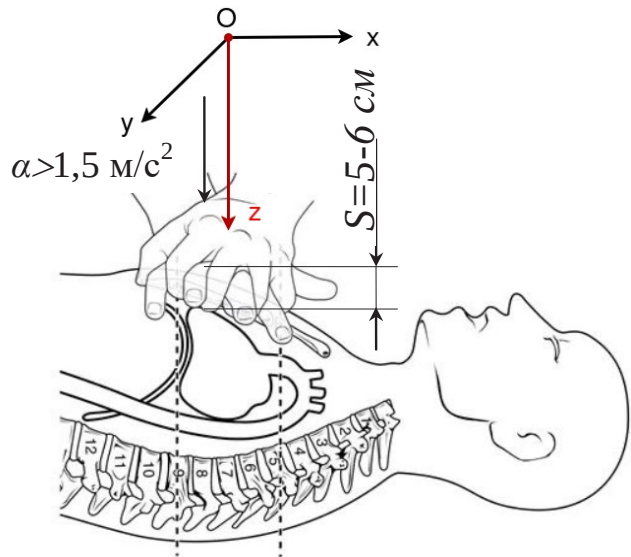


Рис. 2. Схематичне зображення компресії при СЛР та величин її параметрів

Одночасно з визначенням значення сатурації SpO_2 у блоці 20 перевіряється наявність серцебиття у постраждалого. Якщо частота серцевих скорочень або пульс постраждалого становить більше 50 ударів в хвилину то це вказує на те, що постраждалий починає проявляти ознаки життя. В такому випадку СЛР вважається надефективною і рятувальнику видається попереджувальний сигнал про необхідність припинення реанімаційних дій, адже у постраждалого з'явилися усталені ознаки життя та самостійне дихання (блоки 27–28). В іншому випадку рятувальнику необхідно продовжувати СЛР і оцінка якості процедури не змінюється (блок 21).

Інтегральна оцінка якості СЛР здійснюється в інтервалі значень $[0; 1]$. На основі отриманої оцінки якості СЛР формується загальний висновок про правильність дій рятувальника та ефективність СЛР у цілому.

Приклади можливих значень інтегральної оцінки якості СЛР наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Інтегральні оцінки якості СЛР

Індикаційні значення інтегральної оцінки рівня загроз	Якість СЛР	Коментар
Червоний світлодіод, попереджувальний звуковий сигнал	Низька	Висока загроза смерті постраждалого. Необхідно збільшити силу та частоту компресій
Червоний світлодіод	Середня	Необхідно збільшити або силу або частоту компресій.
Жовтий світлодіод	Вище середнього	Необхідно підтримувати силу та частоту компресій.
Зелений світлодіод	Висока	Постраждалий може скоро проявити ознаки життя. Необхідно підтримувати силу та частоту компресій.
Зелений світлодіод, попереджувальний звуковий сигнал	Надвисока	Постраждалий проявляє ознаки життя. Необхідно зупинити виконання СЛР.

Спеціалізований програмний код, написаний для мікроконтролера [1] АСЯ СЛР, забезпечує практичну реалізацію запропонованого алгоритмічного забезпечення визначення інтегральної оцінки якості СЛР. Кінцеві та поточні оцінки якості виконання СЛР виводяться рятувальнику на спеціальному табло, що має інтуїтивно зрозумілий інтерфейс.

Результатом застосування запропонованих розробок є підвищення зручності використання АСЯ СЛР, точності визначення параметрів СЛР та швидкості корегування дій непрофесійних рятувальників до режиму реального часу, зменшення помилок рятувальників. Це у цілому підвищує шанси постраждалих на виживання.

Запропоноване у цій роботі алгоритмічне забезпечення АСЯ СЛР дозволяє в автоматизованому режимі та режимі реального часу з високою точністю та швидкодією визначати правильність та ефективність дій непрофесійних рятувальників. Розроблений інтуїтивно зрозумілий інтерфейс відображає інформацію у вигляді світлових та звукових сигналів, що покращує її сприйняття непрофесійними рятувальниками на 70% порівняно з іншими методами, наприклад за допомогою диспетчера [7]. Це дозволяє вчасно в режимі реального часу коригувати дії непрофесійних рятувальників, що підвищує шанси постраждалих на виживання.

Заглядаючи в майбутнє, можна виділити кілька напрямків, які можуть розширити цю роботу. З методологічної точки зору, інтеграція елементів штучного інтелекту, для доповнення обмежених даних про показники ознак життя постраждалих та параметри СЛР може підвищити надійність розробки. Математичні дослідження альтернативних механізмів підвищення працездатності, стресостійкості та уваги непрофесійних рятувальників при СЛР може призвести до подальших удосконалень. Експериментальне тестування алгоритмічного забезпечення АСЯ СЛР за різних

погодних умов навколишнього середовища посилить його застосовність у різних середовищах. Проте, можуть виникнути певні труднощі, як то необхідність збільшення обчислювальних ресурсів, ускладненість програмного забезпечення та інтерфейсу користувача.

Загалом, можна стверджувати, що розробка має науково-практичну цінність розвиваючи точність та швидкодію складових автоматизованих систем оцінки якості СЛР, створюючи умови для підвищення шансів постраждалих на виживання на етапі первинної домедичної допомоги безпосередньо на місці пригоди до прибуття медичних працівників.

Подальший розвиток даного дослідження може здійснюватися у напрямку практичної реалізації запропонованих розробок у вигляді портативного комплексу для рятувальника та постраждалого.

Висновки.

1. В статті приводиться опис розробленого алгоритмічного забезпечення АСЯ СЛР та інтегральної оцінки якості СЛР, що дозволяє в автоматизованому режимі не тільки оцінювати якість СЛР але й надає можливість коригування дій непрофесійних рятувальників в режимі реального часу, з огляду на несприятливі морально-психологічні завади, що можуть виникати у критичних ситуаціях та призводити до помилок їх дій.

2. Визначені показники правильності та ефективності дій рятувальників, та їх критичні значення. Комплексна оцінка якості СЛР за допомогою таких параметрів, як частота та глибина виконання компресії грудної клітки та сатурація SpO2 допоможе рятувальникам корегувати свої дії в режимі реального часу та підвищує шанси постраждалих на виживання.

3. Запропонована інтегральна оцінка якості СЛР є основою алгоритмічного забезпечення АСЯ СЛР, яка може використовуватись непрофесійними рятувальниками безпосередньо на місці пригоди до прибуття медичних працівників.

Список літератури:

1. Маркова Є. Д. Система зворотного зв'язку для оцінки ефективності серцево-легеневої реанімації. *Biomedical engineering and technology*. 2024. Т. 14, № 2. С. 74–84. DOI: <https://doi.org/10.20535/2617-8974.2024.14.304140>.
2. Closed-loop machine-controlled CPR system optimises haemodynamics during prolonged CPR / P. S. Sebastian et al. *Resuscitation Plus*. 2020. Vol. 3. P. 100021. URL: <https://doi.org/10.1016/j.resplu.2020.100021>
3. Automatic Detection of Ventilations During Mechanical Cardiopulmonary Resuscitation / X. Jaureguibeitia et al. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*. 2020. Vol. 24, no. 9. P. 2580–2588. DOI: <https://doi.org/10.1109/jbhi.2020.2967643>
4. A smartphone application to provide real-time cardiopulmonary resuscitation quality feedback / E. Stumpf et al. *The American Journal of Emergency Medicine*. 2022. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ajem.2022.06.045>

5. Automated Cardiopulmonary Resuscitation (ACR): Enhancing Life-Saving Interventions during Cardiac Arrest / N. Mukhtiar et al. *THE PROGRESS: A Journal of Multidisciplinary Studies*. 2025. Vol. 6, no. 2. P. 188–199. DOI: <https://doi.org/10.71016/tp/bfzn0c70>
6. Xie J., Wu Q. Design and Evaluation of CPR Emergency Equipment for Non-Professionals. *Sensors*. 2023. Vol. 23, no. 13. P. 5948. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23135948>
7. Dispatcher-Assisted Cardiopulmonary Resuscitation – Influence on Return of Spontaneous Circulation and Short-Term Survival / S. S. Nikolovski et al. *General Reanimatology*. 2021. Vol. 17, no. 5. P. 52–64. DOI: <https://doi.org/10.15360/1813-9779-2021-5-52-64>
8. ERC. Bringing resuscitation to the world. ERC, *Bringing resuscitation to the world*. URL: <https://www.erc.edu/>
9. Про затвердження протоколів надання медичної допомоги за спеціальністю «Медицина невідкладних станів» : Наказ від 17.01.2005. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0024282-05#Text>.

Markova Ye.D., Cherepanska I.Yu. ALGORITHMIC IMPLEMENTATION OF AN AUTOMATED SYSTEM FOR ASSESSING THE QUALITY AND EFFICIENCY OF CARDIOPULMONARY RESUSCITATION

The article is devoted to the problem of automating the assessment of the effectiveness and quality of actions of lay rescuers when performing cardiopulmonary resuscitation directly at the scene of the accident. Assessment of the correctness of the rescuer's resuscitation actions in real time is necessary for timely adjustment of the performed cardiopulmonary resuscitation (CPR) procedure and increasing the chances of the victims to restore vital activity. Limited time for rescue and critical conditions for conducting resuscitation measures significantly worsen the condition of a lay rescuer; therefore, for high-quality performance of resuscitation, he needs feedback on the correctness of his actions and tips on performing resuscitation in accordance with regulatory medical documents.

The article describes the algorithmic support of a previously developed automated system for assessing the quality and effectiveness of cardiopulmonary resuscitation. The basis of the proposed algorithmic support is the developed integral quality assessment, which allows for a comprehensive assessment of the correctness and effectiveness of the actions of lay rescuers according to a set of CPR parameters regulated by regulatory medical documents and indicators of human life signs. The algorithmic support was developed taking into account adverse moral and psychological obstacles and significant fatigue, which have a high probability of occurring in critical situations and lead to errors in the actions of lay rescuers. The assessment of resuscitation actions obtained as a result of the algorithm can be provided to the rescuer and used as feedback for adjusting the implementation of the CPR procedure. The algorithmic support is an integral environment that combines a set of special technical means as part of the ASQE CPR. The ASQE CPR can be used by lay rescuers directly at the scene of the accident before the arrival of medical personnel.

Key words: algorithmic implementation, cardiopulmonary resuscitation, integrated quality assessment, automated system, first aid.

Дата надходження статті: 18.10.2025

Дата прийняття статті: 07.11.2025

Опубліковано: 30.12.2025