
ПРИЛАДИ І СИСТЕМИ БІОМЕДИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

DOI: 10.20535/1970.70(2).2025.348022

УДК 681.5+614.8

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ СЕРЦЕВО-ЛЕГЕНЕВОЇ РЕАНІМАЦІЇ

Маркова Є. Д., Черепанська І. Ю.

Національний технічний університет України

"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, Україна

E-mail: cherepanskairina@gmail.com, lizmahrk@gmail.com

Стаття присвячена актуальній проблемі □ автоматизації оцінки якості дій рятувальників при серцево-легеневій реанімації (СЛР) постраждалих в позалікарняних умовах. Оцінка правильності та ефективності дій непрофесійних рятувальників, що проводять СЛР постраждалих безпосередньо на місці пригоди до прибуття медичних працівників, а також вчасне коригування їх дій відповідно до вимог нормативних медичних документів, є надзвичайно важливою проблемою. Успішне вирішення цієї проблеми підвищує шанси постраждалих на виживання в несприятливих позалікарняних умовах.

Аналіз відомих рішень щодо автоматизації оцінки якості дій рятувальників при СЛР показав, що проблема оцінки якості усієї процедури СЛР та автоматизованої корекції дій непрофесійних рятувальників під час проведення СЛР постраждалих безпосередньо на місці пригоди до прибуття медичних працівників ще не повністю вирішена. У зв'язку з цим у статті запропоновано автоматизовану систему оцінювання якості та ефективності серцево-легеневої реанімації (АСЯ СЛР). Пропонована АСЯ СЛР дозволяє автоматизовано оцінювати правильність та ефективність дій рятувальників при СЛР, та якість СЛР у цілому, з високою точністю в режимі реального часу. Розроблена АСЯ СЛР орієнтована на використання непрофесійними рятувальниками, які надають первинну домедичну допомогу постраждалим в критичних умовах. Ці умови характеризуються морально-психологічним тиском та швидкою фізичною втомлюваністю рятувальників. Це з високою ймовірністю може призводити до помилок рятувальників при СЛР на первинній стадії, яка проводиться безпосередньо на місці пригоди до прибуття медичних працівників. Саме тому непрофесійні рятувальники потребують сторонньої зовнішньої допомоги направленої на контроль та корегування їх дій, а також контроль ознак життя постраждалих.

Розроблена АСЯ СЛР дозволяє автоматизовано в режимі реального часу контролювати множину параметрів СЛР відповідно до нормованих значень, що регламентуються множиною нормативних медичних документів, а також показники ознак життя постраждалих, вчасно проводити коригування дій рятувальників. Коригування дій рятувальників щодо виконання СЛР здійснюється шляхом автоматичного формування повідомлень у зручній для них формі, зокрема введенні на екран у вигляді світлових індикацій та формування звукового попереджувального сигналу. Передбачається, що застосування пропонованої розробки матиме значний соціальний ефект, що проявлятиметься у зменшенні втомлюваності рятувальників, підвищенні їх стресостійкості та збільшенні шансів постраждалих на виживання.

Keywords: серцево-легенева реанімація, автоматизація оцінювання якості, MEMS акселерометр, мікроконтролери.

Вступ. Постановка проблеми

Щодня люди стикаються з численними ризиками, серед яких найбільш ймовірними є ризики, пов'язані із необхідністю надання невідкладної домедичної допомоги, зокрема виконання дій пов'язаних із серцево-легеневою реанімацією (СЛР). Наприклад, при ураженні електричним струмом, блискавкою, утопленні, отруєнні, виникненні різних травм, нещасних випадків тощо, що супроводжуються втратою свідомості. Відомо, що більшість постраждалих, які потребують невідкладної допомоги, гине від того, що домедична (первинна) допомога була надана несвоєчасно або некоректно [1, 2].

Відсутність допомоги тяжко постраждалим протягом 1 години після ушкодження збільшує кількість смертельних наслідків на 30 %, до 3 годин – на 60 %, до 6 годин – на 90 % [3]. У той же час, за статистикою у результаті вчасно та правильно проведених реанімаційних заходів в медичних закладах до життя повертають близько 70 % постраждалих і лише 5 % – при проведенні реанімаційних дій непрофесійними рятувальниками в позалікарняних умовах [4, 6] безпосередньо на місці пригоди до прибуття лікарів. Це обумовлюється не завжди правильними та неадекватними діями непрофесійних рятувальників, які діють в стресових умовах. Саме

тому, для рятувальників, які хоча б один раз пройшли навчання з домедичної (первинної) допомоги та знають найпростіші термінові заходи для порятунку життя і здоров'я потерпілих, а також мають початкові навички проведення СЛР, надзвичайно важливим є зовнішній контроль за правильністю та адекватністю їх дій, а також оцінювання якості та ефективності проведення СЛР.

Процедура СЛР, у тому числі, яка виконується безпосередньо на місці пригоди до прибуття лікарів непрофесійними рятувальниками та медичними працівниками при відсутності регламентованих медичних засобів та ліків, має багаторічну практику застосування, а послідовність, правильність та ефективність дій суворо регламентується відповідними нормативними документами [4, 5]. Так, наприклад, на першій стадії проведення базової СЛР, яка у переважній більшості випадків здійснюється на місці пригоди непрофесійними рятувальниками до прибуття лікарів, необхідно здійснювати контроль і відновлення прохідності дихальних шляхів, штучну підтримку кровообігу та дихання. Для цього виконується, у тому числі, непрямий масаж серця, ефективність якого залежить від багатьох факторів. Зокрема, від правильного вибору місця розташування точки компресії на груднині, рук рятувальника, сили натискання та частоти компресій. Зокрема, регламентовано, що сила натискання повинна бути такою, щоб зміщення груднини потерпілого у напрямку до хребта було не менше 4–5 см, а частота компресій повинна становити 100÷120 натискань за хвилину [3, 4, 7, 8]. СЛР на місці події проводиться до прибуття служби екстреної медичної допомоги або до появи ознак біологічної смерті [3]. При цьому критеріями якісного проведення СЛР є поява у постраждалого дихання, серцебиття та пульсу, нормалізація насиченості крові киснем. При початку проведення реанімаційних заходів показник сатурації крові дорівнює 80 %, а правильному проведенні СЛР це значення повинно сягати не менше 90 % [5]. Також, непрямими ознаками успішно виконаного СЛР є звуження зіниць, нормалізація забарвлення шкіри, виявлення артеріальної пульсації синхронної з масажем серця, а також пасивні рухи грудної клітки при виконанні штучної вентиляції легень.

Очевидно, що СЛР є досить трудомістким процесом, що вимагає правильних та скоординованих дій, значних енергетичних витрат рятувальників та обмежених витрат часу. Саме тому автоматизація процесу оцінювання якості та ефективності СЛР шляхом високоточного вимірювання її параметрів та показників життєдіяльності постраждалого, обробки результатів в режимі реального часу, та визначення показників якості СЛР, особливо на першій базовій стадії, є надзвичайно важливим та актуальним завданням. В цьому контексті розробка новітньої системи оцінювання якості та ефективності серцево-легеневої реанімації (АСЯ СЛР) здатної працювати в автоматизованому режимі та режимі реального часу з високою точністю та швидкістю є актуальною нау-

ково-технічною задачею, розв'язання якої забезпечить у значній мірі вирішення існуючої проблеми.

Аналіз останніх досліджень

Контроль якості СЛР, зокрема на першій базовій стадії, передбачає високоточне автоматизоване вимірювання множини різних за значенням та фізичною природою параметрів, високоточну та швидкодійну автоматизовану обробку множини вимірювальних даних, та представлення результату у зручному для користувача вигляді в режимі реального часу.

На сьогодні відома низка зарубіжних наукових робіт присвячених завданню розробки автоматизованих систем оцінювання якості проведення СЛР. Всі вони передбачають застосування різних засобів, методів та алгоритмів. При цьому відрізняються переліком вимірюваних параметрів, точністю та швидкістю вимірювання і обробки інформації.

Так у роботі [9] представлено огляд низки відомих рішень та класифікацію засобів оцінювання якості СЛР, розглянуто принципи їх роботи, переваги та недоліки, наведено різні сценарії застосування. Наведена низка засобів для оцінювання СЛР, що можуть бути інтегровані в спеціалізоване медичне обладнання, наприклад, дефібрилятори. Інші використовуються в якості самостійної діагностичної одиниці для індивідуального оцінювання фізіологічних параметрів постраждалого. Переважна більшість наведених у роботі [9] засобів для оцінювання якості СЛР використовують основні регламентовані нормативними документами параметри для оцінки якості СЛР – частоту та глибину компресій, повне повернення грудної клітки до вихідного положення після компресії, час максимальної паузи між компресіями. Крім того, низка описаних в роботі [9] засобів для оцінювання якості СЛР, використовують такі додаткові параметри як артеріальний тиск, насичення крові киснем, зменшення якості компресій залежно від часу виконання реанімації. Проте робота [9] має оглядовий характер та не містить конкретних результатів розробок. Наведені відомості є неповними та мають декларативний характер, що обмежує можливості їх повноцінного використання. Зокрема залишається незрозумілим, чи здатні засоби для оцінювання якості СЛР, опис яких наведено в роботі [9], працювати у режимі реального часу, невідомою є ступінь автоматизації, точність вимірювання та швидкість обробки інформації. Таким чином проблема автоматизованого оцінювання якості та ефективності СЛР непрофесійними рятувальниками в режимі реального часу з високою точністю та швидкістю залишилась не вирішеною.

В роботі [10] наводяться результати порівняння показників частоти виживання постраждалих, яким була надана перша домедична допомога у вигляді СЛР звичайним способом, тобто непрофесійними рятувальниками без застосування засобів автоматизованого контролю якості СЛР, та з використанням таких засобів. Показано, що виживаність постраждалих при проведенні СЛР непрофесійними рятува-

льниками зі застосуванням засобів автоматизованого контролю якості СЛР є більшою. Зокрема в роботі [11] наводяться результати застосування автоматизованого пристрою для проведення СЛР AutoPulse, який призначений для автоматизації компресії грудної клітини з частковою участю рятувальників. Пристрій AutoPulse складається з регульованого ремінця, що охоплює грудну клітку постраждалого, та елементів керування. Він автоматично здійснює компресії грудної клітини із частотою 80 разів на хвилину, та може використовуватись виключно медичними працівниками, що професійно володіють навичками СЛР та виконують розширену кардіологічну підтримку із використанням відповідного обладнання.

Очевидним обмеженням щодо застосування AutoPulse є необхідність відповідної медичної освіти у рятувальників та неможливість застосування даного засобу непрофесійними рятувальниками. Крім того, у роботі [11] не наведено інформацію про алгоритм роботи засобу та його функціональні можливості. Зокрема не відомо, які власне параметри СЛР та життєдіяльності постраждалих здатен вимірювати AutoPulse та з якою точністю. Вказане є очевидними недоліками та обмеженнями досліджень роботи [11]. Таким чином проблема автоматизованого оцінювання якості та ефективності СЛР непрофесійними рятувальниками в режимі реального часу з високою точністю та швидкістю залишилась не вирішеною.

У роботі [12] представлено засіб для автоматичного виконання СЛР з частковою участю рятувальників. Зокрема засіб призначено для автоматичного виконання компресії грудної клітини використанням колінчастого валу та можливістю регулювання висоти розташування платформи із рухомою частиною. Це забезпечує виконання компресії. Пристрій виконаний на основі мікроконтролера, із застосуванням датчику сили та датчику серцевого ритму. Вказано, що розробка пройшла тестування на манекені. Пристрій, що описаний у роботі [12], є прикладом окремого класу засобів для виконання СЛР з частковою участю рятувальників. Вони використовуються медичними працівниками в стаціонарних умовах медичних закладів. Даний пристрій автоматично припиняє СЛР, як тільки у постраждалого з'являється самостійне серцебиття. Крім того, даний пристрій здатний попереджати медичний персонал про загрозу травмування потерпілого при компресіях грудної клітки. Це здійснюється шляхом автоматичного вимірювання сили компресій та генерації попереджувального звукового сигналу при перевищенні гранично допустимих значень. Проте, із роботи [12] залишається незрозумілим, які саме параметри вимірює пристрій окрім серцебиття та прикладеної сили компресій грудної клітки. Невідомо чи контролюється глибина компресій, їх частота, чи існують інші умови зупинки автоматизованого СЛР з використанням цього пристрою. При цьому застосування результатів роботи [12] обмежується стаці-

онарними умовами медичних закладів та необхідністю спеціальної медичної освіти рятувальників. Наведений в роботі [12] матеріал потребує додаткового доопрацювання для можливості застосування розробки непрофесійними рятувальниками при СЛР. Отже проблема автоматизованого оцінювання якості та ефективності СЛР непрофесійними рятувальниками в режимі реального часу з високою точністю та швидкістю залишилась не вирішеною.

У роботі [13] описано додаток для смартфона, який використовує вбудований акселерометр смартфона для надання допомоги непрофесійними рятувальниками при виконанні СЛР в критичних умовах. Завдяки акселерометру, додаток вимірює частоту та глибину компресій грудної клітки, надає аудіо-, тактильний та візуальний зворотній зв'язок щодо правильності виконання реанімаційної процедури. Використання смартфона із вже вбудованим акселерометром в якості пристрою для оцінювання СЛР є досить цікавою ідеєю, яка, проте, потребує доопрацювання. Так, недоліком даної розробки можна вважати те, що точність вимірювання залежить від правильного положення телефону на грудній клітці, яке повинно відповідати вертикальній осі вимірювання вбудованого акселерометра смартфона. При цьому, під час проведення реанімації, є висока ймовірність зміщення смартфона із заданого місця розташування, що призведе до необхідності постійного контролю його місцеположення та втрати дорогоцінного часу. Отже проблема автоматизованого оцінювання якості та ефективності СЛР непрофесійними рятувальниками в режимі реального часу з високою точністю та швидкістю у роботі [13] повністю не вирішена.

У роботі [14] представлено комплект обладнання для екстреного виконання СЛР. Комплект складається з елементу одягу, що надівається на грудну клітку постраждалого. В одяг вбудований тензодатчик, аналоговий детектор серцебиття, та пристрій, який надає аудіо- та візуальні підказки щодо правильності виконання компресій. Наводяться результати тестування ефективності застосування даного комплекту обладнання серед експериментальної групи, яка використовувала обладнання при виконанні контрольованого тестового СЛР, та контрольної групи, яка не використовувала його. Середня глибина компресій в експериментальній групі становила $51,5 \pm 1,3$ мм, що значно краще, ніж в контрольній групі ($50,2 \pm 2,2$ мм). Середня частота компресій в експериментальній групі ($110,1 \pm 6,2$ разів/хв) виявилася більш близької до рекомендованої, ніж в контрольній групі ($100,4 \pm 6,6$ разів/хв). Дане обладнання значно покращує якість проведення реанімаційних заходів серед непрофесіоналів. Проте, стаття має дещо декларативний характер. У роботі не наводиться методологія використання параметрів та значень з сенсорів для оцінювання глибини та частоти компресій. Комплект обладнання надає можливість комплексного аналізу множини параметрів СЛР, замість одинарного пристрою, але

при застосуванні в реальних умовах та обмеженого часу, на припасування цього комплексу на постраждалого будуть витрачатися дорогоцінні хвилини реанімації, що є неприпустимим, адже може суттєво зменшити шанси постраждалих на виживання. Отже проблема автоматизованого оцінювання якості та ефективності СЛР непрофесійними рятувальниками в режимі реального часу з високою точністю та швидкістю у роботі [14] повністю не вирішена.

У роботі [15] обговорюється тестування та результати застосування стороннього додатку для смарт-годинника у якості механізму зворотного зв'язку та допомоги при виконанні СЛР. Додаток на екрані смарт-годинника відображає вимірювану частоту виконання компресій та глибину продавлення грудної клітки, а також дає оцінку правильності виконання реанімаційної процедури. У результаті тестування пристрою було виявлено значне покращення точності глибини натискання на грудну клітку ($64.6 \pm 7.8\%$ для групи, яка використовувала смарт-годинник, проти $43.1 \pm 28.3\%$ для тієї групи, яка виконувала класичну процедуру СЛР). Середня частота та сила компресій не відрізняються суттєво між двома групами. Ця робота в деталях описує методологію тестування такого типу пристроїв, проте зовсім не фокусується на розробці додатку та алгоритмах оцінювання. Крім цього, дослідження ґрунтоване лише на тестуванні із тренувальним манекеном, і потребує доопрацювання із результатами або клінічного впровадження, або застосувань у реальних умовах. Таким чином, проблема автоматизованого оцінювання якості та ефективності СЛР непрофесійними рятувальниками в режимі реального часу з високою точністю та швидкістю у роботі [15] повністю не вирішена.

У роботі [16] описано обрахунок параметрів для оцінювання проведення СЛР лише за допомогою акселерометра, а також результати тестування даного методу отримання даних на тренувальному манекені. Акселерометр був розміщений між руками людини, що виконує СЛР та грудною кліткою манекену. Було реалізовано три алгоритми, різних за підходами обробки даних з акселерометра – лінійна фільтрація, аналіз швидкості на спектральний аналіз прискорення. Оцінено та порівняно їх точність, та найвищі показники продемонстрував алгоритм, базований на спектральному аналізі. Дане дослідження є цінним з точки зору опису підходів до реалізації оцінювання параметрів СЛР, проте потребує подальшого доопрацювання із обробкою клінічних даних. Таким чином, питання того, який алгоритм оцінювання даних СЛР є найбільш підходящим для застосування у пристроях, залишається невирішеним у частині статистичного підтвердження отриманих результатів. Отже проблема автоматизованого оцінювання якості та ефективності СЛР непрофесійними рятувальниками в режимі реального часу з високою точністю та швидкістю у роботі [16] повністю не вирішена.

У роботі [17] представлено портативний пристрій для допомоги під час виконання СЛР, подібний до метронома. Пристрій орієнтований на аудіальні підказки. Він задає правильний ритм 100 компресій на хвилину, видає метрономічні звуки, що повинні відповідати 30 натисканням на грудну клітку. На 30-те натискання видає особливий звук, після якого слідує два сигнали тривалістю по одній секунді, що нагадують про виконання штучної вентиляції легень. Пристрій також оснащений трьома світлодіодами різних кольорів, проте вони не використовуються як зворотній зв'язок для оцінки якості, а лише працюють в ритм із звуковими сигналами. З роботи [17] залишається незрозумілим, які саме параметри вимірює пристрій. Таким чином, проблема створення пристрою, що надає зрозумілі підказки для СЛР, але при цьому здатний оцінювати у реальному часі роботу рятувальника при реанімації, залишається невирішеною. Отже проблема автоматизованого оцінювання якості та ефективності СЛР непрофесійними рятувальниками в режимі реального часу з високою точністю та швидкістю у роботі [17] повністю не вирішена.

Таким чином, аналіз сучасного стану світового ринку вимірювальних комплексів і систем для оцінки якості та ефективності СЛР вказує на те, що їх перелік на сьогодні є досить значним. При цьому проблема зовнішнього контролю за правильністю та ефективністю дій непрофесійних рятувальників на першій базовій стадії СЛР, а також оцінювання якості та ефективності її проведення в автоматизованому режимі та режимі реального часу з високою точністю та швидкістю за частотою та глибиною компресій, а також пульсу постраждалого залишається не повністю вирішеною. Крім того, усі відомі розробки та наукові дослідження наразі проводяться тільки іноземними дослідниками. Саме тому розробка та побудова конкурентоспроможних систем автоматизованого оцінювання якості та ефективності СЛР непрофесійними рятувальниками в режимі реального часу з високою точністю та швидкістю для України є надзвичайно важливою та актуальною.

Метою статті є розробка автоматизованої системи оцінювання якості та ефективності серцево-легеневої реанімації (АСЯ СЛР) здатної працювати в автоматизованому режимі та режимі реального часу з високою точністю та швидкістю, а також спроможної надавати підказки щодо правильності та ефективності реанімаційних дій.

Матеріали та методи досліджень

Пропонована АСЯ СЛР розроблена на основі новітніх досягнень науки та техніки в галузях біомедичної інженерії, електроніки, автоматизації та інформаційно-комп'ютерних технологій. Розроблена АСЯ СЛР поєднує такі переваги, як точність та швидкість вимірювання, простота використання, компактність, надійність, автоматизована обробка вимірювальної інформації в режимі реального часу. АСЯ СЛР орієнтована на використання непрофесій-

ними рятувальниками при проведенні СЛР на першій стадії в позалікарняних умовах безпосередньо на місці пригоди до прибуття лікарів. АСЯ СЛР має інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, який призначений для формування підказок непрофесійним рятувальникам щодо правильності та ефективності виконуваних ними дій при СЛР. Наприклад, чи з достат-

ньою силою та на достатню глибину рятувальник продавлює грудну клітку при непрямому масажі серця, чи достатньою є частота компресій, чи з'являються у результаті цих дій у постраждалого ознаки життя тощо.

Структура пропонованої АСЯ СЛР представлена на рис. 1.

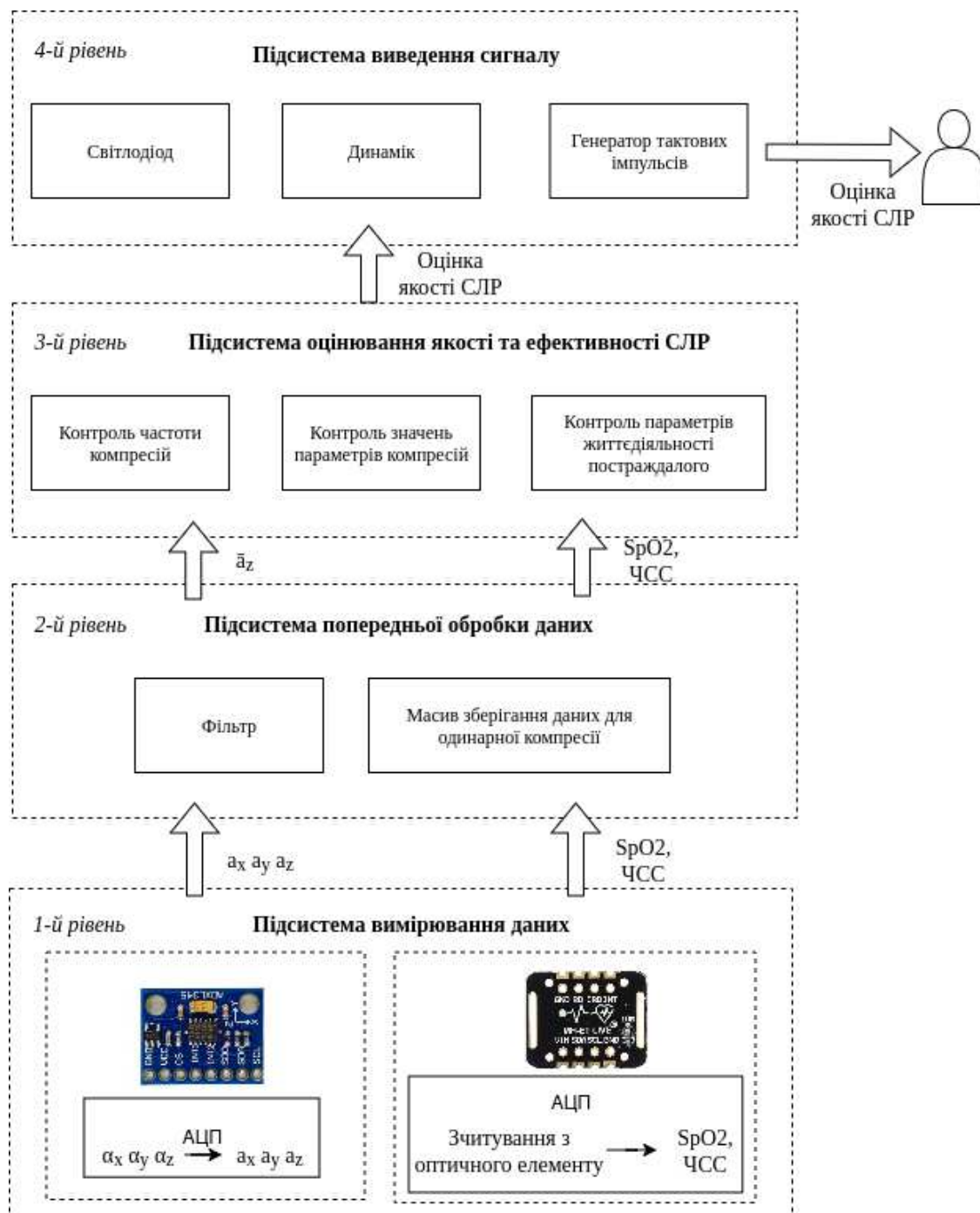


Рис. 1. Структурна схема пропонованої АСЯ СЛР

Пропонована АСЯ СЛР являє собою багаторівневу складну систему, у якій взаємодіють функціонально пов'язані сукупності технічних та програм-

них засобів автоматизації з неоднорідними властивостями. Зокрема до складу АСЯ СЛР входить акселерометр для оцінювання компресій грудної клітки;

двоколірний світлодіод і динамік, які призначені для інформування рятувника про правильність дій. Світлодіод використовується для формування світлового сигналу про якість виконання СЛР. Так вмикання зеленого кольору світлодіоду сигналізує про правильність виконання СЛР, червоного – про неправильність дій рятувальника. Динамік призначений для подання звукових сигналів, які задають регламентовану медичними нормативними документами частоту виконання натискань на грудну клітку 110 разів у хвилину. Також до складу системи входить генератор тактових імпульсів, який працює одночасно із динаміком, та призначений для дублювання частоти виконання натискань на грудну клітку. Також АСЯ СЛР містить датчики пульсу та сатурації крові, які дозволяють контролювати наявність ознак життя постраждалого, зокрема дихання та серцебиття.

Загалом пропонується АСЯ СЛР має чотирирівневу структуру. Нижній (0-й рівень) являє собою підсистему вимірювання даних (ПВД). Вимірювані дані являють собою множину різних за значенням та фізичною природою показників, для оцінки якості виконання СЛР. На цьому рівні формується вхідний вимірювальний сигнал. Засобами вимірювання, а саме акселерометром, датчиком пульсу та сатурації, зчитуються показники прискорення по осях абсолютної декартової системи координат X , Y та Z та частоту серцевих скорочень (пульс) і процент насиченості крові постраждалого киснем (сатурацію крові) та у вигляді цифрового сигналу надають інформацію для обробки, на наступний рівень.

На наступному рівні у підсистемі попередньої обробки даних (ППОД) відбувається фільтрація сигналів від датчиків для усунення шумів їх

підсилення та нормування. У ППОД визначаються відмітки часу початку та кінця одинарної компресії, і дані, що відповідають одинарній компресії, збираються у масив та передаються на наступний рівень до підсистеми оцінювання якості та ефективності СЛР (ПОЯ СЛР). З цього рівня множина цифрових сигналів (значення прискорення, пульсу та сатурації) передається на підсистему обробки та виведення сигналу (ПВС), базовим елементом якої є мікроконтролер STM32F103.

У ПВС здійснюється оцінювання якості та ефективності СЛР шляхом обчислення поточних значень параметрів компресій і показників ознак життя постраждалого, а також порівняння отриманих результатів з нормованими значеннями, що регламентовані медичними нормативними документами. Так, визначення частоти компресій грудної клітки та сили її продавлення здійснюється за допомогою трьохосового акселерометру. Частота компресій грудної клітки визначається шляхом виявлення пікових значень сигналу при прискореннях по вертикальній осі абсолютної декартової системи координат XYZ (рис. 2) та проміжками часу їх виникнення. Сила продавлення грудної клітки визначається як величина прискорення чутливого елементу акселерометра.

Глибину продавлення грудної клітки при натисканні на неї можна також обчислити завдяки значенням прискорення, а також часу виконання одинарного натискання на грудну клітку. Так, глибина натискання на грудну клітку під час виконання одинарного натискання на грудну клітку може характеризуватися зміщенням рук рятувника у просторі вздовж вертикальної осі Z абсолютної системи координат XYZ (рис. 2).

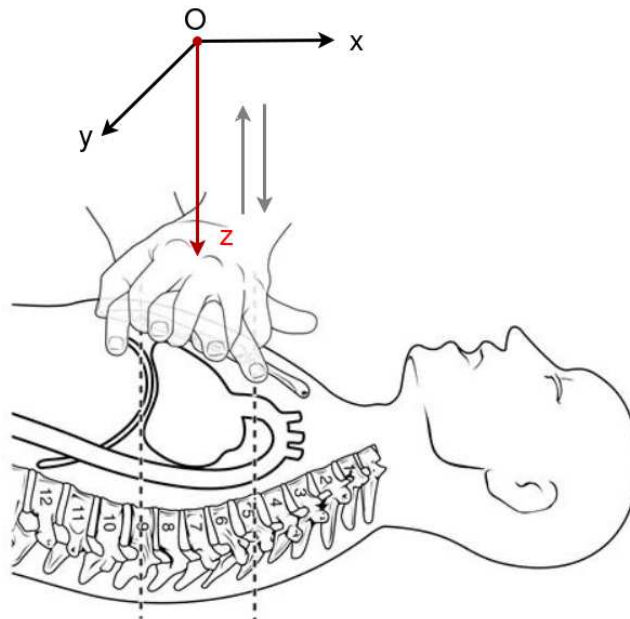


Рис. 2. Схематичне зображення визначення глибини натискання на грудну клітку постраждалого при СЛР

Глибину продавлення грудної клітки при СЛР можна обчислити як величину зміщення чутливого елементу акселерометра по вертикальній осі за відомою формулою наступним чином:

$$S = V_0 t + \frac{1}{2} a t^2, \quad (1)$$

де S – величина зміщення чутливого елементу акселерометра по вертикальній осі Z , м; V_0 – початкова швидкість руху грудної клітки відносно вертикальної осі Z , м/с абсолютної системи координат XYZ (рис. 2); t – час руху грудної клітки відносно вертикальної Z осі при компресії, с; a – прискорення виміряне акселерометром під час натискання на грудну клітку при компресії, м/с².

При виконанні одинарної компресії грудної клітки постраждалого, рятувальник здійснює швидке однократне натискання на неї і очікує повернення грудної клітки у вихідне положення. При поверненні грудної клітки постраждалого у вихідне положення, вона не рухається протягом декількох десятків мілісекунд. Тому початкову швидкість V_0 можна вважати рівною 0 м/с. Тоді величину зміщення чутливого елементу акселерометра S можна обчислити наступним чином за відомою формулою:

$$S = \frac{1}{2} a t^2. \quad (2)$$

На виході з ПВС формується інтегральна оцінка якості СЛР, інформація про яку надається користувачеві за допомогою двоколірного світлодіоду, динаміку та генератор тактових імпульсів. Крім того, динамік та генератор тактових імпульсів формують метрономічні звукові та тактильні сигнали, які задають правильний ритм виконання СЛР, який становить 110 натискань на хвилину.

Інтеграція усіх технічних складових у АСЯ СЛР здійснюється шляхом використання спеціально розробленого алгоритмічно-програмного забезпечення (у статті не наводиться).

Для формування загальної оцінки якості СЛР в АСЯ СЛР використовується спеціально розроблений інтегральний показник якості I , який дозволяє кількісно в інтервалі значень $[0; 1]$ визначити якість СЛР та ефективність дій рятувальників. Інтегральний показник якості I використовує комплексний та порівняльний підхід, який дозволяє здійснити оцінку якості СЛР за множиною параметрів СЛР та показниками ознак життя постраждалого (насиченістю крові киснем або сатурацією та пульсом). В якості параметрів СЛР використовуються параметри одинарної компресії, що корелюють з величиною прискорення αZ по вертикальній осі та зміщення по вертикальній осі IZ , яке виражає глибину продавлення грудної клітки, а також частота компресій.

Практична реалізація пропонованої АСЯ СЛР можлива у вигляді двох портативних пристроїв. Перший пристрій призначений для рятувальника і

кріпиться на його зап'ясті. Пристрій рятувальника містить всередині акселерометр для оцінювання компресій грудної клітини, та двоколірний світлодіод, динамік і генератор тактових імпульсів для надання рятувнику інформації про якість та ефективність виконання СЛР. Другий портативний пристрій призначений для постраждалого і кріпиться на його пальці. Пристрій постраждалого містить у собі датчик пульсу та сатурації крові. Вони використовуються для надання інформації системі про ефективність реанімаційних заходів.

Розроблений діючий макет пропонованої АСЯ СЛР, який дозволяє провести апробацію її працездатності, наведений на рис. 3.

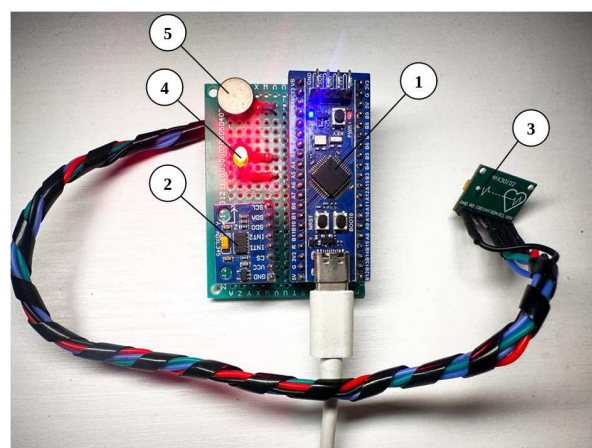


Рис. 3. Макет пропонованої АСЯ СЛР

Макет АСЯ СЛР містить плату 1 розробки WeActBluePill на основі мікроконтролеру (в даному випадку STM32F103C8T6), трьохосовий MEMS-акселерометр 2 (в даному випадку використовується акселерометр типу ADXL345), датчик 3 пульсу та сатурації крові (в даному випадку використовується MAX30102), двоколірний світлодіод 4 із загальним анодом та генератор 5 тактових імпульсів. Додатково передбачається встановлення динаміку (на рис. 4 не показаний) для генерації звукових сигналів.

Експериментальні дослідження працездатності макету пропонованої АСЯ СЛР проводились в позалікарняних умовах із використанням тренувального манекену ТАРАС-М української компанії HEALTH&SO. Отримані результати наведені в роботі [[7]].

В проведенні експериментальних досліджень працездатності макету АСЯ СЛР брав участь спеціаліст із медичною освітою, який виконував якісне СЛР, для отримання множини експериментальних даних із значеннями параметрів СЛР, що відповідають регламентованим. У результаті тестування розробленої АСЯ СЛР було отримано статичну вибірку з 6 тестових сесій СЛР. Під час кожної з сесій, система записувала дані прискорення, а також значення, отриманні з них – швидкість натискання на грудну клітку у м/с, глибину

продавлення грудної клітки у м, та оцінку одинарної компресії. На основі аналізу статистичної вибірки результатів тестування розробленої АСЯ СЛР було встановлено, що середнє прискорення по вертикальній осі під час компресій становить близько $1,5 \text{ м/с}^2$, середня глибина продавлення грудної клітини становить близько 2–2,5 см замість рекомендованих 4–5 [[7]]. Такі значення глибини продавлення можуть бути зумовлені неточним вимірюванням початкової часової відмітки виконання одинарної компресії. Час обробки інформації не перевищує 0,0025 с, що відповідає режиму реального часу.

Висновки

Проведено критичний аналіз останніх досліджень і публікацій щодо автоматизації оцінки якості СЛР рятувальниками та корекції їх дій. Він показав, що дана проблема ще не повністю вирішена.

Обґрунтовано необхідність розробки власної автоматизованої системи оцінки якості серцево-легеневої реанімації.

Представлено структуру запропонованої автоматизованої системи оцінки якості серцево-легеневої реанімації, що орієнтована на непрофесійних рятувальників, які проводять реанімацію постраждалих в нестійких морально-психологічних умовах та швидко втомлюються.

Передбачено, що розроблена автоматизована система оцінки якості серцево-легеневої реанімації дозволить підвищити ефективність дій не професійних рятувальників, їх стресостійкість та шанси постраждалих на виживання.

У подальшому розвитку, АСЯ СЛР має потенціал стати основою для дослідження ознак ефективності реанімаційних заходів, зокрема аналізу виявлення ознак появи у постраждалого самостійного кровообігу.

Література

- [1] О. С. Сичов, Стандарти надання медичної допомоги хворим із порушеннями ритму та провідності серця, 2014.
- [2] І. С. Зозуля, *Медицина невідкладних станів: швидка і невідкладна медична допомога*. ВСВ «Медицина», 2012.
- [3] П. Ф. Дудка, “Сучасні аспекти проведення серцево-легеневої реанімації,” *Астма та алергія*, no. 1, pp. 56–60, 2014. [Електронний ресурс]. Доступно: <http://www.ifp.kiev.ua/doc/journals/aa/14/pdf14-1/56.pdf>
- [4] European Resuscitation Council, [Online]. Available: <https://www.erc.edu/>
- [5] МОЗ України, Наказ № 24 «Про затвердження протоколів надання медичної допомоги за спеціальністю “Медицина невідкладних станів”», 17.01.2005. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0024282-05#Text>
- [6] В. С. Тіторчук, “Реанімаційні заходи: методика та необхідність проведення,” *Медсестринство*, № 1, с. 47–51, 2020. DOI: 10.11603/2411-1597.2020.1.11041
- [7] American Heart Association, “What is CPR?,” [Online]. Available: <https://cpr.heart.org/en/resources/what-is-cpr>
- [8] British Heart Foundation, “How to do CPR,” [Online]. Available: <https://www.bhf.org.uk/how-you-can-help/how-to-save-a-life/how-to-do-cpr>
- [9] Y. Wang, S. Ma, Z. Chen, B. Fan, and S. Hou, “Feedback Devices for Cardiopulmonary Resuscitation: A Narrative Review,” *Applied Sciences*, vol. 13, no. 18, pp. 10222, 2023. DOI: 10.3390/app131810222
- [10] P. A. Jennings, L. Harriss, S. Bernard, et al., “An automated CPR device compared with standard chest compressions for out-of-hospital resuscitation,” *BMC Emergency Medicine*, vol. 12, no. 1, 2012. DOI: 10.1186/1471-227X-12-8
- [11] Zoll Medical, “AutoPulse Resuscitation System for Emergency Care,” 2025. [Online]. Available: <https://www.zoll.com/en-us/products/emergency-care/automated-cpr/autopulse-resuscitation-system>
- [12] N. Mukhtiar, U. Memon, F. Talpur, F. Shamim, and S. Nasim, “Automated Cardiopulmonary Resuscitation (ACR): Enhancing Life-Saving Interventions during Cardiac Arrest,” *THE PROGRESS: A Journal of Multidisciplinary Studies*, vol. 6, no. 2, pp. 188–199, 2025. DOI: 10.71016/tp/bfzn0c70.
- [13] E. Stumpf, R. T. Ambati, R. Shekhar, S. J. Staffa, D. Zurakowski, and P. Sinha, “A Smartphone application to provide real-time cardiopulmonary resuscitation quality feedback,” *The American Journal of Emergency Medicine*, vol. 60, pp. 34–39, 2022. DOI: 10.1016/j.ajem.2022.06.045.
- [14] J. Xie and Q. Wu, “Design and Evaluation of CPR Emergency Equipment for Non-Professionals,” *Sensors*, vol. 23, no. 13, pp. 5948, 2023. DOI: 10.3390/s23135948
- [15] C. Ahn, J. Lee, J. Oh, Y. Song, Y. Chee, et al., “Effectiveness of feedback with a smartwatch for high-quality chest compressions during adult cardiac arrest: A randomized controlled simulation study,” *PLOS ONE*, vol. 12, no. 4, p. e0169046, 2017. DOI: 10.1371/journal.pone.0169046
- [16] S. Ruiz de Gauna, D. M. González-Otero, J. Ruiz, and J. K. Russell, “Feedback on the Rate and Depth of Chest Compressions during Cardiopulmonary Resuscitation Using Only Accelerometers,” *PLOS ONE*, vol. 11, no. 3, e0150139, 2016. DOI: 10.1371/journal.pone.0150139
- [17] S. C. Kim, et al., “A Simple Audio-visual Prompt Device Can Improve CPR Performance,” *The Journal of Emergency Medicine*, vol. 44,

но. 1, pp. 128–134, 2013. DOI:
10.1016/j.jemermed.2011.09.033
[18] Є. Д. Маркова та І. В. Давидович. “Система
зворотного зв'язку для оцінки ефективності

серцево-легеневої реанімації,” *Biomedical
Engineering and Technology*, no. 14(2), pp. 74–84,
2024. DOI: 10.20535/2617-8974.2024.14.304140

UDC 681.5+614.8

Y. D. Markova, I. Y. Cherepanska

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

AUTOMATED SYSTEM FOR ASSESSING THE QUALITY AND EFFICIENCY OF CARDIOPULMONARY RESUSCITATION

The article is devoted to the current problem of automating the assessment of the quality of rescuers' actions during cardiopulmonary resuscitation (CPR) of injured people in out-of-hospital conditions. The assessment of the correctness and effectiveness of the actions of lay rescuers performing CPR of injured people directly at the scene of the accident before the arrival of medical workers, as well as timely correction of their actions in accordance with the requirements of regulatory medical documents, is an extremely important problem. Solving this problem increases the chances of people injured in accidents to survive in adverse out-of-hospital conditions.

Analysis of known solutions for automating the assessment of the quality of rescuers' actions during CPR demonstrated that the problem of assessing the quality of the entire CPR procedure and automated correction of the actions of lay rescuers during CPR of victims directly at the scene of the accident before the arrival of medical workers has not yet been fully resolved. In this regard, the article proposes an automated system for assessing the quality and effectiveness of cardiopulmonary resuscitation (ASQE CPR). The proposed ASQE CPR allows for automated assessment of the correctness and effectiveness of rescuers' actions during CPR, and the quality of CPR in general, with high accuracy in real time. The developed ASQE CPR is aimed at use by lay rescuers who provide primary pre-medical assistance to victims in critical conditions. These conditions are characterized by moral and psychological pressure and rapid physical fatigue of rescuers. This can with high probability lead to rescuers' errors during CPR at the initial stage, which is carried out directly at the scene of the accident before the arrival of medical workers. That is why lay rescuers need external assistance aimed at controlling and correcting their actions, as well as monitoring the vital signs of victims.

The developed ASQE CPR allows for automated real-time control of a set of CPR parameters in accordance with the normalized values regulated by a set of regulatory medical documents, as well as indicators of the vital signs of injured people, and timely correction of rescuers' actions. Correction of rescuers' actions regarding CPR is carried out by automatically generating messages in a form convenient for them, in particular, entering them on the screen in the form of light indications and generating an audible warning signal. It is assumed that the application of the proposed development will have a significant social effect, which will be manifested in reducing the fatigue of rescuers, increasing their stress resistance and increasing the chances of injured people to survive.

Key words: cardiopulmonary resuscitation, automated quality assessment, MEMS accelerometer, microcontrollers.

*Надійшла до редакції
12 жовтня 2025 року*

*Рецензовано
20 листопада 2025 року*



© 2025 Copyright for this paper by its authors.
Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).