

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ІВАНА ПУЛЮЯ

НИКИТЮК ВЯЧЕСЛАВ ВЯЧЕСЛАВОВИЧ

УДК 519.21+535-94+611.314

**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЕЛЕКТРИЧНОГО ЗОНД-СИГНАЛУ ДЛЯ
ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІКИ СТАНУ РЕСТАВРАЦІЙНОГО
СТОМАТОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ**

01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Тернопіль – 2019

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор,
Драган Ярослав Петрович,
Національний університет «Львівська політехніка»,
професор кафедри програмного забезпечення.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор, лауреат Державної
премії України в галузі науки і техніки
Щербак Леонід Миколайович,
Приватний вищий навчальний заклад «Київський
міжнародний університет»,
завідувач кафедри комп'ютерних наук

кандидат технічних наук, доцент
Сверстюк Андрій Степанович,
Тернопільський державний медичний університет
імені І. Я. Горбачевського,
доцент кафедри медичної інформатики

Захист відбудеться «31» травня 2019 р. о 14:00 год на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 58.052.01 у Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя (46001, Тернопіль, вул. Руська, 56, ауд. 79).

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56.

Автореферат розісланий «30» квітня 2019 року.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



Б. Г. Шелестовський

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Поряд із діагностичною, терапевтичною, реконструктивною особливо поширеною сьогодні є реставраційна стоматологія, що полягає зокрема у відновленні твердих тканин зуба (емалі) при карієсі фото полімерними або світло-затвердними матеріалами (надалі стоматологічний матеріал). Рівень захворюваності на карієс у населення в різних регіонах України досягає 98%, згідно статистичних даних ВООЗ становить 95%. Для усунення каріозних дефектів зубів сьогодні широко використовуються стоматологічні матеріали, полімеризація яких здійснюється під дією опромінювання з довжиною хвилі 380-500нм (в основному УФ-випромінювання). Домінуючою експлуатаційною характеристикою таких матеріалів є міцність та полімеризація, оскільки саме від цих показників залежить експлуатаційна надійність, довговічність матеріалу тощо.

Для отримання якісного кінцевого продукту (пломби) важливим є забезпечення оптимального часу опромінювання стоматологічного матеріалу, оскільки зменшення цього часу призводить до погіршення якості пломби, а його збільшення – до негативного впливу на поверхні внутрішніх порожнин рота, функціонування слинних залоз, тощо. Тому актуальним технічним завданням є забезпечення в УФ-випромінювачах (активаторах) можливості автоматизованого контролю часу полімеризації стоматологічних матеріалів для досягнення оптимальних експлуатаційних параметрів їх.

На ринку стоматологічного обладнання не виявлено технічних засобів, які давали б змогу контролювати час полімеризації стоматологічного матеріалу. Оцінювання міцності матеріалів у стоматології проводиться методами, що визначаються стандартом ISO 4049:2009. Однак, такі методи є руйнівними і після їх застосування наступне використання стоматологічного матеріалу неможливе. Також такі методи не дають можливості проведення експрес-оцінювання міцності матеріалів безпосередньо в процесі формування пломби. Тому актуальною є задача контролю та забезпечення пошуку неруйнівних методів визначення міцності стоматологічного матеріалу.

Одним з неруйнівних методів може бути метод, який ґрунтується на реєстрації електричного зонд-сигналу, що є результатом перетворення відбитого від поверхневого шару стоматологічного матеріалу УФ-випромінювання в зміну напруги фотоелектричного перетворювача (фотодіода) та наступному опрацюванні такого сигналу засобами комп'ютерної техніки. При цьому, пломбуєчий матеріал розглядається як енергоактивний об'єкт, який поглинає енергію випромінюючого сигналу для забезпечення процесу полімеризації, а зміни енергетичних характеристик електричного зонд-сигналу дають змогу оцінити кількість поглинутої енергії в процесі полімеризації пломбуєчого матеріалу та протікання процесу в часі для визначення оптимального часу опромінення пломбуєчого матеріалу. При цьому, методи опрацювання визначаються математичною моделлю, яка має бути адекватною задачі дослідження, фізичній природі таких сигналів та містити у своїй структурі інформативну ознаку зміни процесу полімеризації стоматологічного матеріалу.

Наведені аргументи вказують на актуальність задачі обґрунтування математичної моделі електричного зонд-сигналу та розроблення методу статистичного опрацювання для виявлення нових інформативних ознак в області реставраційної стоматології, які були б ефективними індикаторами процесу полімеризації стоматологічного матеріалу.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота є складовою частиною наукових робіт Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя. Окремі результати роботи були отримані при виконанні наукових тем: – «Дослідження змін функціонального стану організму людини за біосигналами засобами енергетичної теорії стохастичних сигналів», інвентарний номер державної реєстрації № 0111U005289, 2011-2013 р. – обґрунтування математичної моделі та розроблення методу опрацювання електричних зонд-сигналів в рамках енергетичної теорії стохастичних сигналів; – «Інформаційні технології дослідження сигналів з характерними особливостями періодичності», інвентарний номер державної реєстрації № 0116U006601, 2018 р. – обґрунтовано метод контролю стану процесу полімеризації відбитого зонд-сигналу для реєстрації зміни електричних та частотних характеристик.

Мета і задачі дослідження. Метою дослідження є обґрунтування математичної моделі електричного зонд-сигналу та розроблення на основі неї методу опрацювання досліджуваного сигналу з можливістю застосування нових інформативних ознак динаміки стану процесу полімеризації стоматологічних матеріалів. Досягнення мети забезпечує розв'язання таких задач:

1. Розробити метод неруйнівного контролю процесу полімеризації стоматологічного матеріалу за електричним зонд-сигналом, як індикатором динаміки стану енергоактивного об'єкта;
2. Обґрунтувати математичну модель електричного зонд-сигналу, яка поєднує у своїй структурі властивості періодичності із стохастичністю, для розроблення засобу візуалізації динаміки процесу полімеризації стоматологічного матеріалу;
3. Розробити метод статистичного опрацювання реалізацій електричного зонд-сигналу, базуючись на обґрунтованій математичній моделі, для виявлення нових інформативних ознак, які були б індикаторами динаміки стану процесу полімеризації;
4. Запропонувати нові інформативні ознаки електричного зонд-сигналу для задачі оцінювання стану процесу полімеризації стоматологічного матеріалу.
5. Провести експериментальний відбір та опрацювання електричних зонд-сигналів та комп'ютерного імітаційного моделювання для верифікації математичної моделі і методу опрацювання.

Об'єкт дослідження: процес моделювання та опрацювання електричного зонд-сигналу.

Предмет дослідження: математична модель електричного зонд-сигналу, властивості та можливості, які вона забезпечує при розв'язанні задачі стану динаміки процесу полімеризації стоматологічних матеріалів.

Методи дослідження методи енергетичної теорії стохастичних сигналів та засобів статистичної теорії вибору рішень при верифікації математичної моделі електричного зонд-сигналу. Для програмної реалізації алгоритмів опрацювання використано пакет прикладних програм MATHWORKS MATLAB R2017B (V.9.3).

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Уперше розроблено метод неруйнівного контролю процесу полімеризації стоматологічного матеріалу для визначення оптимального часу і контролю протікання процесу, який ґрунтується на відборі та опрацюванні електричного зонд-сигналу, що є результатом відбитого сигналу (енергії) від поверхневого шару стоматологічного матеріалу.
2. Обґрунтовано математичну модель електричного зонд-сигналу у вигляді періодично корельованого випадкового процесу, що дало змогу контролювати автоматизований процес полімеризації стоматологічного матеріалу в часі.
3. Уперше застосовано інформативні ознаки електричного зонд-сигналу – кореляційні компоненти, які виражають динаміку процесу полімеризації стоматологічного матеріалу в реставраційній стоматології.
4. Розроблено метод комп'ютерного імітаційного моделювання електричного зонд-сигналу базуючись на математичній моделі у вигляді періодично корельованого випадкового процесу.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що на базі обґрунтованої математичної моделі електричного зонд-сигналу змодифіковано алгоритм синфазного методу опрацювання, який дає змогу виділяти інформативні ознаки процесу полімеризації стоматологічного матеріалу для забезпечення автоматизованого контролю часу. Отримані практичні результати придатні для використання при проектуванні стоматологічних фотополімерних випромінювачів з функцією автоматизованого контролю часу. Даний підхід є актуальним та практичним результатом роботи, який дає змогу забезпечити досягнення потрібних якостей процесу полімеризації стоматологічного матеріалу. Результати дисертаційних досліджень впроваджено при виконанні наукових досліджень: в стоматологічній практиці «Назаренко Т.М.»; в приватній стоматології «Круглицьких»; в приватній стоматологічній клініці «ЯНСІ»; в навчальному процесі кафедри дитячої стоматології Тернопільського державного медичного університету ім. І. Я. Горбачевського.

Акти впровадження наведено в Додатку В до дисертації.

Особистий внесок. Основні результати, які становлять суть дисертаційної роботи, отримані дисертантом самостійно. У працях, опублікованих у співавторстві, дисертанту належить у працях [1, 9] – обґрунтування методу оцінювання стоматологічного матеріалу за зміною характеристик в процесі його полімеризації; у працях [2, 11] – обґрунтування математичної моделі електричного зонд-сигналу (фотоелектричного) у вигляді імпульсного періодично корельованого випадкового процесу та способу подання його через трансляційні компоненти; у працях [3, 13] – обґрунтування структури та технічних параметрів складових елементів системи відбору електричних зонд-сигналів (фотоелектричних) для задачі визначення стану стоматологічного процесу; у працях [4, 14] –

обґрунтування застосування енергетично-сигнальної концепції процедури визначення стану технологічного стоматологічного процесу, як енергоактивного об'єкту; у праці [5] – виявлення часових моментів закінчення процесу полімеризації стоматологічного матеріалу; у праці [7] – обґрунтування процесу автоматизованого відбору електричного зонд-сигналу з регульованим активатором; у праці [8] – обґрунтування актуальності задачі моделювання процесу затвердіння фотополімерного пломбувального матеріалу для оцінювання його фізико-механічних параметрів; у праці [15] – обґрунтування актуальності вибору математичної моделі для забезпечення автоматизованого контролю реєстрації електричного зонд-сигналу.

Апробація результатів дисертації. Викладені в дисертаційній роботі результати доповідалися і обговорювалися на Міжнародній науково-практичній конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, 2010 р.; на XI Міжнародній науковій конференції «Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об'єктів» Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, 2012 р.; на Міжнародній науково-практичній конференції SWorld «Современные направления теоретических и прикладных исследований 2013» м. Одеса 2013 р.; на Всеукраїнській науково-технічній конференції «Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування» Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, 2013 р.; на XVII науковій конференції «Природничі науки та інформаційні технології» Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, 2013 р.; на International periodic scientific journal «МИР Науки и инноваций 2015» м. Иваново. Научный мир. – 2015.; на II Всеукраїнській науково-технічній конференції «Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування» Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, 2015 р.; на VI Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій». – Тернопіль: ТНТУ ім. І. Пулюя, 2017.

В цілому робота доповідалася на науковому семінарі Інституту комп'ютерних наук та інформаційних технологій Національного університету «Львівська політехніка» (м. Львів), в Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя (м. Тернопіль).

Публікації. Основні результати досліджень, що відображені у дисертаційній роботі, опубліковано у 15 наукових працях: з них у 5 статтях, що входять до переліку наукових фахових видань України з технічних наук (5 з яких у виданнях, зареєстрованих в наукометричних базах даних з Міжнародним індексом цитування Index Copernicus [2 – 5], Google Scholar [1 – 5], Polish Scholarly Bibliography [3]), 2 статті в міжнародних періодичних виданнях (зареєстровані в наукометричних базах даних з Міжнародним індексом цитування eLibrary [7], International Innovative Journal Impact Factor (IIJIF) [6, 7], Directory of Indexing and Impact Factor (DIIF) [6, 7], Scientific Indexing Services (SIS) [6, 7], International Scientific Indexing (ISI) [7], Cite Factor (Academic Scientific Journal) [7]) та 8 публікацій у матеріалах

Міжнародних та Всеукраїнських науково-технічних й науково-практичних конференцій.

Структура та обсяг. Дисертаційна робота складається із анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертаційної роботи становить 160 сторінок, з яких 110 сторінок основного тексту, 3 додатків на 12 сторінках, список літератури налічує 127 джерел.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** шляхом аналізу стану задачі оцінювання динаміки процесу полімеризації стоматологічного матеріалу за електричним зонд-сигналом обґрунтовано актуальність теми дисертації, відзначено зв'язок роботи з науковими темами, сформульовано мету і задачі дослідження, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, показано наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, розкрито питання апробації результатів дисертації на конференціях і семінарах та висвітлення їх у друкованих працях.

У **першому розділі** описано динаміку стану та специфіку задачі візуалізації процесу полімеризації стоматологічного матеріалу за електричним зонд-сигналом. Проаналізовано основні типи матеріалів, що застосовуються в реставраційній стоматології, для формування пломб (із вказаним значенні заданих фізико-механічних параметрів в процесі полімеризації, які досягаються завдяки УФ-випромінювання). Якість кінцевого продукту (пломби) залежить від часу опромінення матеріалу УФ-випромінювання. Для забезпечення заданих фізико-механічних параметрів стоматологічного матеріалу та зменшення негативного впливу УФ-випромінювання на ротову порожнину необхідним є розроблення методу неруйнівного контролю процесу полімеризації стоматологічного матеріалу. Відомі методи оцінювання цих параметрів за ISO 4049:2009 є руйнівними, оскільки в процесі оцінювання порушується цілісність матеріалу та не забезпечують можливості проведення контролю протікання процесу якості затвердіння пломби протягом часу полімеризації стоматологічного матеріалу.

Розроблено метод неруйнівного контролю процесу полімеризації стоматологічного матеріалу, що ґрунтується на основних положеннях системно-сигнальної концепції, відповідно до якої оцінити роботу системи можна шляхом належного опрацювання сигналу, що є результатом роботи цієї системи, та концепції енергоактивності, що центральним розглядає енергоактивний об'єкт (систему), якому притаманні такі характерні риси, як ініціація, активізація, каталіз специфічною дією носія енергії. Істотним у формуванні сигналу в енергоактивних системах є «поділ енергії» на ту, що потрібна для підтримання процесу дії системи, і ту, що витрачається на створення сигналу про стан системи і на енергетичне забезпечення перенесення даних про нього. У випадку полімеризації стоматологічного матеріалу енергоактивним об'єктом виступає власне матеріал, який поглинає енергію УФ-випромінювання для забезпечення процесу полімеризації, а інформативним сигналом про перебіг процесу полімеризації – частина УФ-випромінювання, яка відбивається від поверхні матеріалу в процесі формування пломби. Якщо взяти до уваги описані вище властивості, притаманні енергоактивному об'єктові, в ролі якого виступає разовий стоматологічний виріб (пломба), то суть методу буде такою: стоматологічний матеріал наносять на

проблемну ділянку зуба та опромінують УФ-випромінюванням, джерелом (активатор) якого є спеціальні фотополімеризатори; частина енергії опромінювання поглинається в процесі полімеризації стоматологічного матеріалу (для підтримання процесу полімеризації), а частина відбивається як від поверхні нанесеного стоматологічного матеріалу, так і від поверхні полімеризованого шару матеріалу. Так відбувається «поділ енергії» – на ту, що спрямовується на підтримання процесу полімеризації (частина енергії, яка поглинається стоматологічним матеріалом), і ту, що витрачається на створення сигналу про стан системи і перенесення даних про нього (частина енергії, що відбивається від поверхні полімеризованого шару стоматологічного матеріалу). Реалізацію описаного методу ілюструє рис. 1.

УФ-випромінювання з інтенсивністю I_0 (рис. 1), джерелом якого є фотополімеризатор (активатор) опромінювання якого, падає на поверхню стоматологічного матеріалу 1, енергія цього випромінювання витрачається на процес полімеризації матеріалу. Частина падаючого УФ-випромінювання на поверхню матеріалу відбивається від поверхневого шару (промінь з інтенсивністю I_1), інша частина відбивається від поверхні полімеризованого шару матеріалу (промінь з інтенсивністю I_2). Якщо позначити інтенсивність УФ-випромінювання, яка витрачається на підтримання процесу полімеризації – I_x (поглинається шаром 3, при чому $I_x \xrightarrow{t \rightarrow t_{STOP}} 0$, де t_{STOP} – момент часу закінчення процесу полімеризації), то виходячи з теорії ТОЕ справедливим буде виконання рівності: $I_0 = I_1 + I_2 + I_x$, де I_0 – відома величина, що визначається параметрами стоматологічного фотополімеризатора; I_1 – інтенсивність відбитого УФ-випромінювання від поверхні матеріалу, що є константою для кожного типу матеріалу; I_2 та I_x є інформативними складовими сигналу, який зареєстрований приймачем випромінювання.

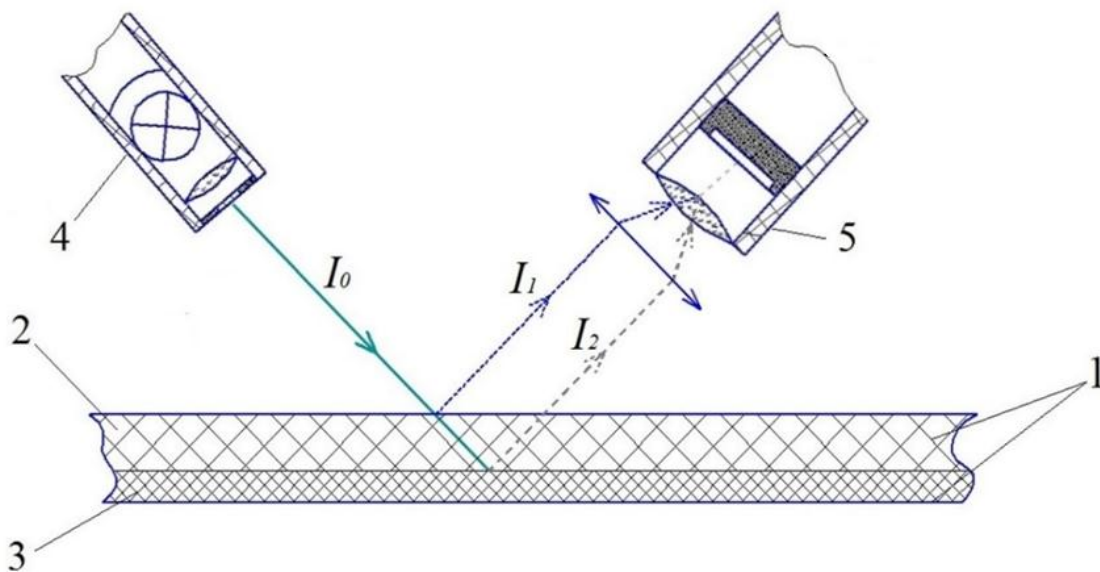


Рис. 1. Схема визначення динаміки станів технологічного стоматологічного процесу:

1 – стоматологічний матеріал, 2 – неполімеризований шар матеріалу, 3 – полімеризований шар матеріалу, 4 – джерело (активатор) УФ-випромінювання, 5 – приймач випромінювання (напівпровідниковий фотодіод)

За зміною величини I_2 можна визначити стан технологічного стоматологічного процесу – особливості проходження процесу полімеризації стоматологічного матеріалу в часі.

За типом породження сигналу у описаному методі визначення стану реставраційного стоматологічного процесу використовується як варіант зондування, а інформація про стан такого процесу міститься у відбитому УФ-випромінюванні, яке реєструється у вигляді зонд-сигналу. Для забезпечення можливості оцінювання динаміки процесу полімеризації та зниження впливу зовнішніх факторів (зовнішнє фонове випромінювання) доцільним є опромінювання стоматологічного матеріалу спалахами УФ-випромінювання із наперед заданими параметрами (в дослідженнях тривалість окремого спалаху опромінення становила 1 с із паузами між спалахами такої ж тривалості). Для можливості опрацювання зонд-сигналу з допомогою обчислювальних засобів комп'ютера виконано перетворення зміни оптичного УФ-випромінювання в зміну електричної напруги з допомогою фотоелемента (отриманий сигнал названо електричним зонд-сигналом).

Для автоматизації процесу опрацювання та репрезентативності отриманих результатів необхідним є розроблення коректного методу опрацювання електричних зонд-сигналів, який визначається математичною моделлю, що повинна бути адекватною як фізичній природі сигналів так і задачі дослідження.

Враховуючи специфіку поставлених задач та особливості досліджуваного процесу необхідно виділити характеристики електричного зонд-сигналу, що несуть інформацію про динаміку процесу полімеризації стоматологічних матеріалів та повинні бути враховані в математичній моделі, і, як наслідок, сформулювати вимоги до нової математичної моделі.

У **другому розділі** проаналізовано фізичні особливості процесу формування електричного зонд-сигналу та сформульовано вимоги до математичної моделі такого роду сигналів. Враховуючи результати проведеного аналізу, обґрунтовано математичну модель електричного зонд-сигналу у вигляді періодично корельованого випадкового процесу.

В структурі окремо взятого спалаху (активатора) електричного зонд-сигналу відображаються ознаки протікання трьох проміжних процесів, які сукупно характеризуватимуть проходження процесу полімеризації стоматологічного матеріалу в часі: перехідний процес активації УФ-випромінювача, перехідний процес полімеризації, та власне процес полімеризації. На рис. 2 зображено вигляд одного спалаху електричного зонд-сигналу полімеризації матеріалу.

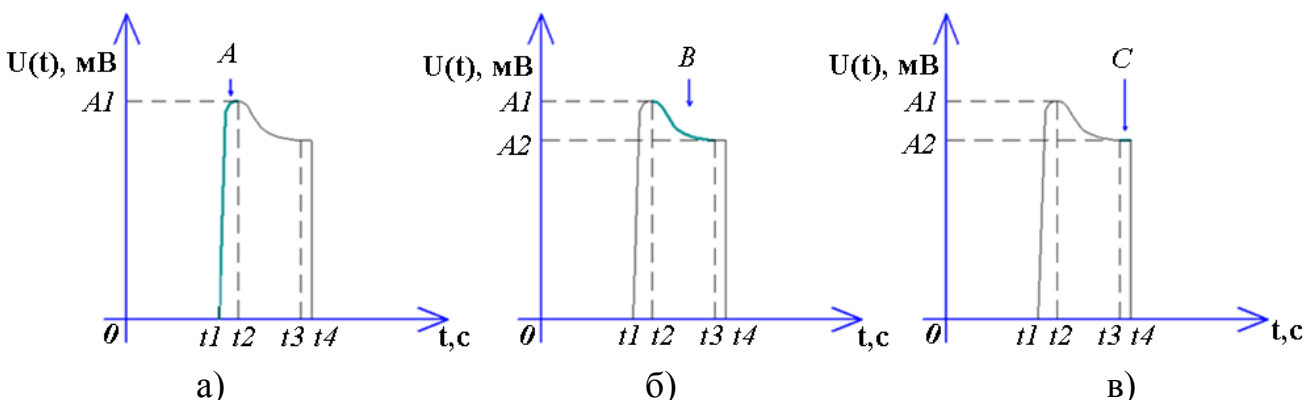


Рис. 2. Структура спалаху (активатора) електричного зонд-сигналу

В сигналі наявна стала, спричинена частиною світлового потоку, відбитою від поверхні матеріалу, з інтенсивністю I_1 (рис. 1). Спалах містить три основні криві – А (t_1-t_2), В (t_2-t_3) та С (t_3-t_4).

На рис. 2а потовщеною лінією показано криву А (t_1-t_2), що є переднім фронтом спалаху електричного зонд-сигналу. Цей фронт є похилим і характеризує перехідний процес виходу активатора на усталений режим роботи.

На рис. 2б показано вигляд кривої В (t_2-t_3). При попаданні на не полімеризований шар матеріалу опромінювання від активатора починається процес полімеризації шару (процес є інерційним).

На рис. 2в зображено вигляд кривої С (t_3-t_4). Після завершення перехідного процесу починається затвердіння полімеризованого шару матеріалу, який і відображає крива С.

Відповідно до методу реєстрації сигналу, електричний зонд-сигнал є результатом відбиття від стоматологічного матеріалу серії УФ спалахів та перетворення їх в імпульсну зміну електричної напруги з допомогою фотоелектричного перетворювача. Ці імпульси (рис. 2) зображено на одній осі часу (рис. 3), що дає можливість побачити залежність зміни у часі відбиття сигналу від спалаху до спалаху та оцінити динаміку процесу полімеризації (шляхом оцінювання зміни параметрів таких імпульсів в часі).

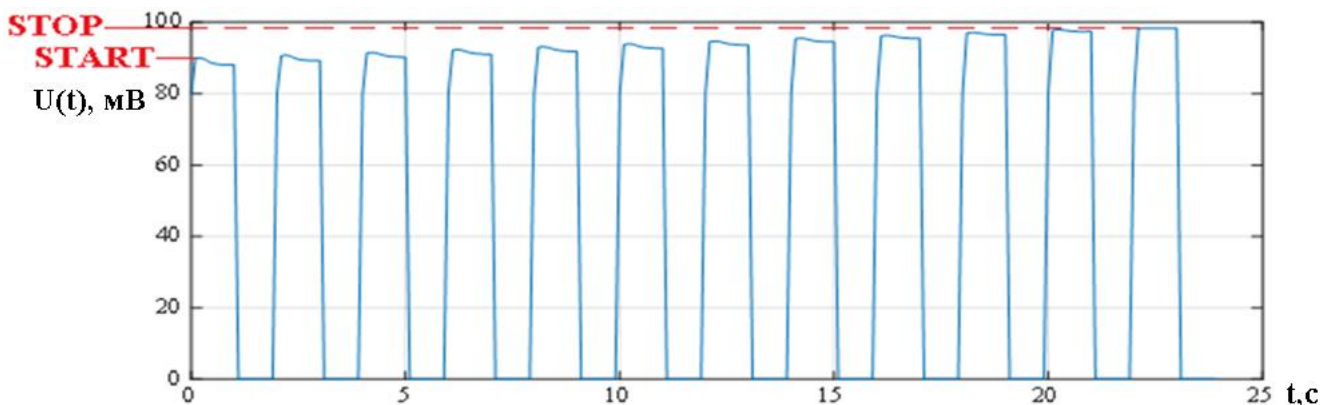


Рис. 3. Зображення імпульсів електричного зонд-сигналу на одній осі часу як періодичне його продовження

Для наступного аналізу використано реалізації електричного зонд-сигналу, що експериментально зареєстровані з допомогою системи, яка описана в третьому розділі. Вигляд вибірки з одної реалізації реєстрограми наведено на рис. 4.

Електричний зонд-сигнал, як сукупність імпульсів, характеризується періодичністю, що забезпечує однаковість фаз процесу породження сигналу через інтервал часу, який рівний фіксованому періодові УФ спалаху.

Оскільки при реєстрації електричного зонд-сигналу УФ спалахи формуються періодично із заданим періодом $T_{СПАЛ}$ та тривалостями, тому структура такого сигналу буде періодичною із тим самим періодом.

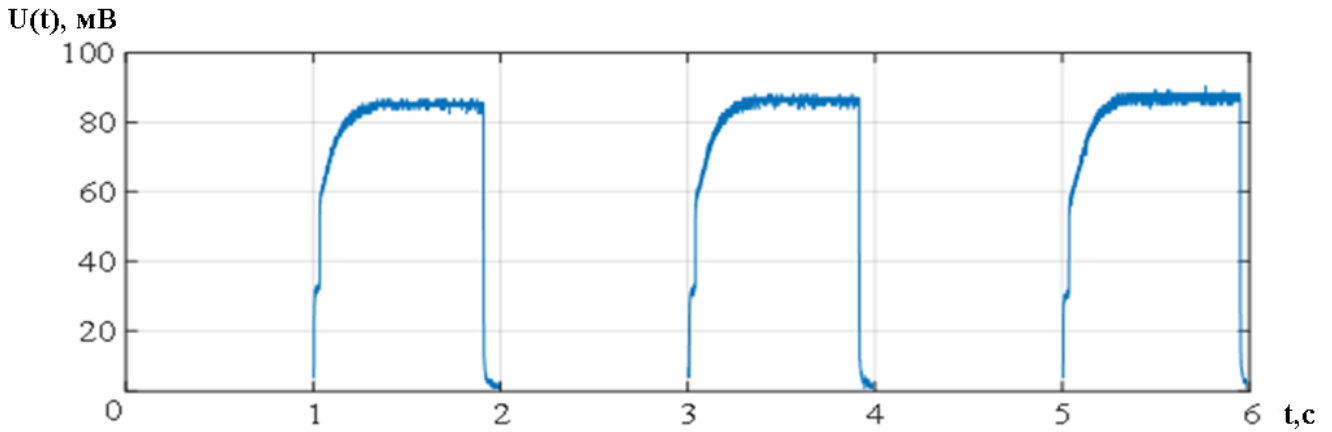


Рис. 4. Вибірка з реалізації експериментально зареєстрованого електричного зонд-сигналу

Враховуючи такий механізм формування, електричний зонд-сигнал подано як множину імпульсів, зсунутих у часі один відносно одного на сталий період $T = T_{\text{спал}}$ у вигляді:

$$\xi(t) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} \chi_{D_k}(t) \cdot \xi_{\text{імпульс}_k}(t - kT), \quad t \in \mathbb{R}, \quad (1)$$

де $\chi_{D_k}(t) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } t \in D_k \\ 0, & \text{якщо } t \notin D_k \end{cases}$ – індикаторна функція множини D_k ;

$D_k = [kT, (k+1)T)$ – часовий діапазон тривалості k -го відгуку $\xi_{\text{імпульс}_k}(t), t \in [0, T)$;

T – тривалість одного спалаху електричного зонд-сигналу.

Зображення електричного зонд-сигналу у вигляді (1) враховує у своїй структурі поєднання властивостей періодичності із стохастичністю, і тим самим дає можливість врахувати та оцінити статистичну взаємопов'язаність між різними імпульсами відбиття від стоматологічного матеріалу однієї і тієї ж серії спостережень, що неможливе в разі традиційного подання однотипної серії реакцій у вигляді ансамблю реалізацій.

В результаті проведеного морфологічного аналізу структури електричного зонд-сигналу (рис. 2) та природи породження окремих його імпульсів встановлено, що адекватна математична модель такого класу сигналів має врахувати у своїй структурі властивість періодичності (задається періодичністю УФ спалах) та стохастичності (є наслідком впливу зовнішніх чинників, неоднорідності складу та товщини нанесення стоматологічного матеріалу, зміни кута опромінення тощо).

У термінах енергетичної теорії стохастичних сигналів такі властивості враховує математична модель у вигляді періодично корельованого випадкового процесу ПКВП, яка має засоби вираження як пов'язаності гармонічних складових, так і зміни ймовірнісних характеристик. За означенням ПКВП це процес, кореляційна функція якого задовольняє умови $r_\xi(t+T, s+T) = r_\xi(t, s)$, $T > 0$, для всіх

$$t, s \in \mathbb{R} \text{ та } \frac{1}{T} \int_0^T r_\xi(t, t) dt < \infty.$$

Розглядаючи відбиття від стоматологічного матеріалу кожного спалаху як реалізації ПКВП, на часових інтервалах $[kT, (k+1)T)$, можна сукупність (множину) їх трактувати, як реалізацію подання ПКВП через трансляційні компоненти:

$$\xi(t) = \sum_{p \in Z} \sum_{k \in N} \alpha_k(p) \Phi_k(t - pT), \quad (2)$$

де $\alpha(p) = [\alpha_k(p)]_{k \in N}$, $p \in Z$ – векторна стаціонарна послідовність;

$\{\Phi_p(t), p \in N, t \in [pT, (p+1)T)\}$ – трансляційний базис у функційному просторі $L^2(0, T)$;

$\{\alpha(n), n \in Z\}$ – послідовність трансляційних стаціонарних компонент.

Зображення (2) адекватне імпульсним форматам сигналів і ефективно при моделюванні електричного зонд-сигналу та поданні його у вигляді імпульсного ПКВП.

Модель у вигляді імпульсного ПКВП визначає загальні методи статистичного опрацювання сигналу: синфазний та компонентний, що використовуються для обчислення статистичних оцінок їхніх ймовірнісних характеристик, які у випадку опрацювання електричного зонд-сигналу є інформативними, тобто показниками динаміки процесу полімеризації стоматологічного матеріалу.

У третьому розділі проведено обґрунтування структури та технічних характеристик системи відбору електричних зонд-сигналів. На основі обґрунтованої математичної моделі у вигляді імпульсного ПКВП змодифіковано синфазний метод статистичного опрацювання таких сигналів та отримано нові вирази для числення статистичних оцінок їхніх характеристик.

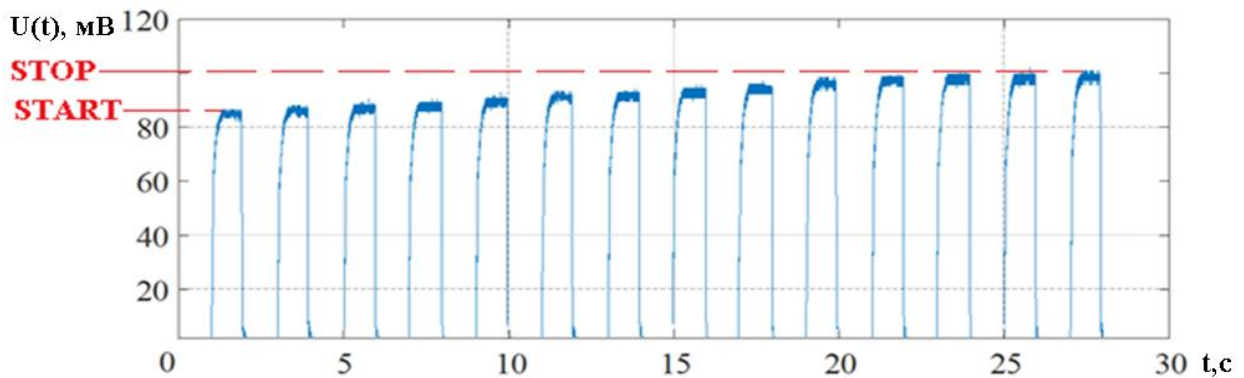
Обґрунтовано структуру та параметри складових елементів системи для автоматизованого контролю часу стоматологічного матеріалу, що може бути реалізована у вигляді окремого модуля стоматологічних фото полімеризаторів для забезпечення можливості безпосереднього контролю часу експозиції композитного стоматологічного матеріалу і контролю якості одержаної пломби. Структура системи (рис. 5) включає такі елементи, як випромінювач (джерело-активатор УФ-випромінювання), джерело живлення випромінювача, приймач відбитого УФ-випромінювання – формувач електричного зонд-сигналу, фільтр низьких частот ФНЧ для усунення впливів від джерел зовнішнього освітлення, аналогово-цифровий перетворювач АЦП для оцифрування електричного зонд-сигналу та блок опрацювання оцифрованого електричного зонд-сигналу. Блок опрацювання формує сигнал керування блоком живлення випромінювача (вмикає його і вимикає після завершення необхідного часу).

Обґрунтовано параметри структурних елементів системи відбору. Для досліджень використано УФ лампу, що застосовується в фото полімеризаторах серії Woodpeker Led B. Для реєстрації випромінювання, відбитого від поверхні полімеризованого шару стоматологічного матеріалу, використано фотодіод типу SR10SPD470-09. Для оцифрування отриманого електричного зонд-сигналу використано АЦП цифрового осцилографа ATTEN ADS 1102 CAL.

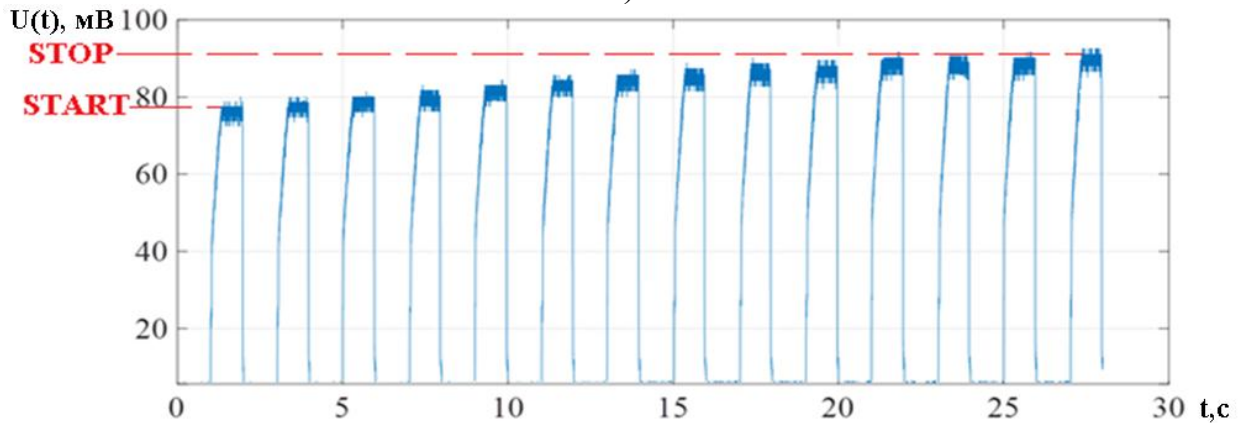


Рис. 5. Структурна схема системи відбору електричних зонд-сигналів

При реєстрації сигналів частота дискретизації АЦП становила 5кГц, розрядність – 8біт. Опрацювання відібраних сигналів проводилось на персональному комп'ютері в середовищі Matlab. Приклади реєстрограм електричних зонд-сигналів, що відібрані описаною вище системою в процесі полімеризації одного і того ж зразка стоматологічного матеріалу з різною товщиною нанесення та без попередньої фільтрації, наведені на рис. 6.



а)



б)

Рис. 6. Приклад вибірок з експериментально зареєстрованого електричного зонд-сигналу

Для виявлення можливості виділення інформативних ознак електричного зонд-сигналу, які були б індикаторами процесу полімеризації стоматологічного матеріалу, проаналізовано можливості, що дає застосування синфазного методу оцінювання імовірнісних характеристик такого типу сигналів.

Синфазний метод виходить з того, що відліки значень реєстрограми електричного зонд-сигналу через період корельованості при різному виборі початку відліку (початкової фази) $t_0 \in [0, T]$ утворюють стаціонарну ергодичну векторну випадкову послідовність $\{\xi(t_0), t_0 \in [0, T]\}$, де позначено $\xi(t_0) \equiv \{\xi(t_0 + kT), k \in Z\}$, для якої оцінки математичного сподівання $\hat{m}_\xi(t)$ та кореляційної функції $\hat{r}_\xi(t, t)$ є періодичними з періодом T , що називається періодом корельованості. При цьому, для задачі оцінювання динаміки стоматологічного процесу інформативними будуть коефіцієнти m_k та B_k розкладів таких оцінок в ряди Фур'є (в силу наявності періодичності математичного сподівання та кореляційної функції ПКВП):

$$m_\xi(t) = \sum_{k \in Z} m_k e^{ik\Lambda t}; \quad r_\xi(t+u, t) = b_\xi(t, u) = \sum_{l \in Z} B_k(u) e^{ik\Lambda t}; \quad \Lambda = \frac{2\pi}{T},$$

при чому, $B_k(u)$ є компонентами розкладів кореляційних функцій $b_\xi(t, u)$ та характеризують структуру часової мінливості електричного зонд-сигналу, а їхні оцінки для випадку періодично корельованих випадкових послідовностей числяться за виразом:

$$\hat{B}_k(u) = \frac{1}{N_T} \sum_{n=0}^{N_T-1} \hat{b}_\xi(n\Delta t, u) \cdot e^{ik \frac{2\pi}{N_T} n}, \quad (3)$$

де N_T – дискретний період корельованості електричного зонд-сигналу; $N_T = T / \Delta t$ – крок дискретизації.

У четвертому розділі наведено результати опрацювання електричного зонд-сигналу, відібраного з допомогою описаної системи реєстрації, змодифікованим синфазним методом. Розроблено комп'ютерну імітаційну модель електричного зонд-сигналу базуючись на моделі у вигляді періодично корельованої випадкової послідовності. Результати аналізу ймовірнісних характеристик імітаційної моделі підтвердили коректність імітаційного моделювання (відповідність обчислених оцінок з імітованого та експериментально відібраного сигналу), що, в свою чергу, стало підставою для верифікації вибраної у розділі 2 математичної моделі електричного зонд-сигналу.

Для встановлення моменту часу закінчення процесу полімеризації стоматологічного матеріалу проведено оцінювання статистик сигналу в межах інтервалу часу, який рівний періоду сигналу – в межах ковзного вікна. При цьому ковзне вікно зсувається в часі на постійну величину, що рівна періоду сигналу (тобто, наступне і попереднє вікно не перекриваються). На рис. 7. наведено вигляд реалізації електричного зонд-сигналу та переміщення ковзного вікна по ньому. При

цьому, $T_1, T_2, T_3, \dots, T_n$ позначено 1, 2, 3, \dots , n- не вікно, в межах якого проводиться опрацювання сигналу.

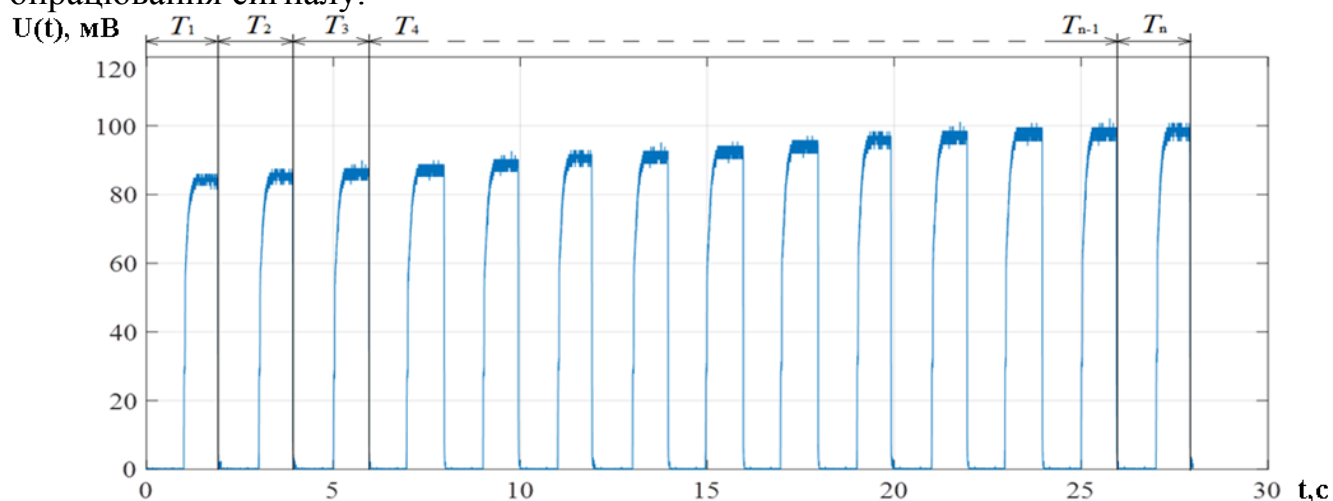


Рис. 7. Вигляд реалізації електричного зонд-сигналу та переміщення ковзного вікна

Припущено, що на ділянці електричного зонд-сигналу, яка відповідає процесу полімеризації стоматологічного матеріалу, оцінки статистик, що обчислені в межах попереднього та наступного вікна, будуть суттєво різнитись між собою, тоді як на ділянках сигналу, що відповідають завершенню процесу полімеризації, відмінність між оцінками буде незначною.

Для обґрунтування критерію встановлення моменту часу закінчення процесу полімеризації стоматологічного матеріалу проведено обчислення різниці між значеннями оцінок дисперсії електричного зонд-сигналу, що розраховувались в межах наступного та попереднього вікна. Встановлено, що на ділянках електричного зонд-сигналу, які відповідають процесу полімеризації стоматологічного матеріалу, різниця між значеннями дисперсії $\Delta_{\text{полімеризація}}$ становлять:

$$\Delta_{\text{полімеризація}} = (55 \pm 10\%) \text{ мкВ},$$

а на ділянках, що відповідають завершенню процесу полімеризації стоматологічного матеріалу, ця різниця Δ_{STOP} становить:

$$\Delta_{\text{STOP}} = (6 \pm 10\%) \text{ мкВ}.$$

Оскільки $\Delta_{\text{полімеризація}}$ та Δ_{STOP} відрізняються майже на порядок, значення Δ , що може бути означене як варіація оцінок дисперсії електричного зонд-сигналу в межах ковзного вікна, є чутливим до зміни стану стоматологічного процесу – полімеризації стоматологічного матеріалу та закінчення цього процесу, а тому може бути використане як критерій встановлення моменту часу закінчення процесу полімеризації. Однак, значення Δ можуть відрізнятись від дійсних внаслідок впливів на процес відбору електричних зонд-сигналів зовнішніх суб'єктивних факторів, таких, як зміна кута опромінення стоматологічного матеріалу в процесі його полімеризації через мимовільні рухи рук стоматолога, зміна величини фонового освітлення тощо.

Для усунення цих недоліків необхідним є паралельне оцінювання динаміки стоматологічного процесу за результатами опрацювання електричних зонд-сигналів синфазним методом. Із реалізацій експериментально відібраних

електричних зонд-сигналів, вигляд яких наведено на рис. 6, сформовано стаціонарні компоненти, оцінки яких наведено на рис. 8.

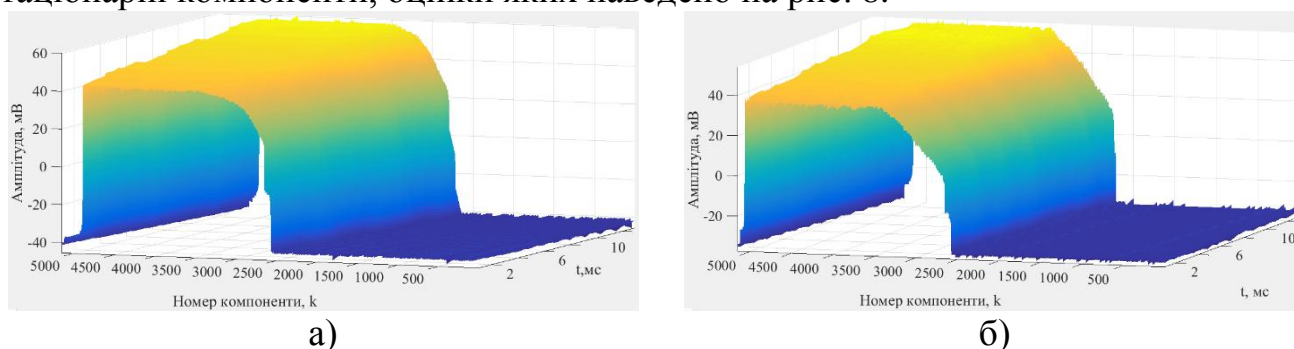


Рис. 8. Реалізації стаціонарних компонент, обчислені електричного зонд-сигналу, зображених на рис. 4

Основною імовірнісною характеристикою електричного зонд-сигналу, яка відображає розподіл потужності центрованих сигналів, є кореляційна функція. Тому, проведено обчислення оцінок кореляційної функції $b_{\xi}(t, u)$, що наведені на рис. 9.

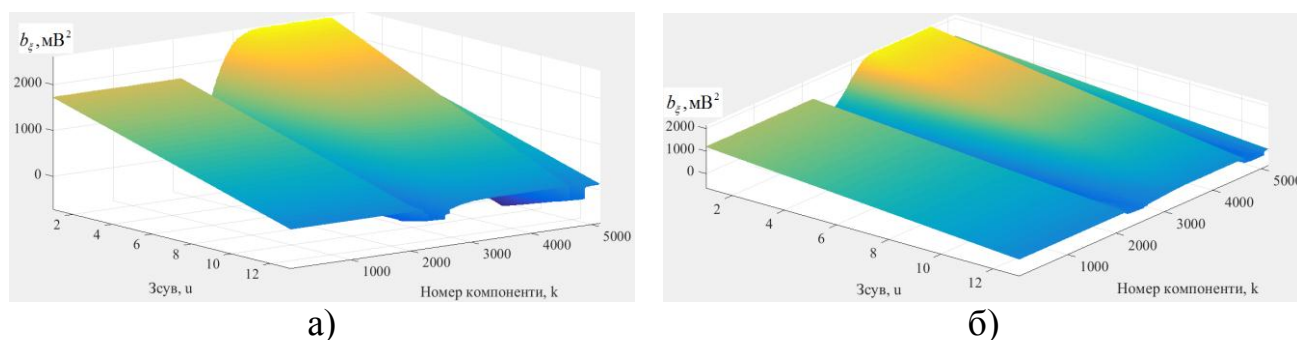


Рис. 9. Оцінки кореляційних функцій стаціонарних компонент (рис. 8)

Для отриманих оцінок кореляційних функцій почислено оцінки кореляційних компонент (рис. 10). Кореляційні компоненти обчислено показують зв'язок між стаціонарними компонентами, і відповідно часову мінливість сигналу. Зміна енергії електричного зонд-сигналу в часі внаслідок зміни процесу полімеризації через зовнішні та внутрішні фактори відобразиться у вигляді зміни рельєфності кореляційних компонент, за ознаками якої можна судити про часові моменти початку і кінця процесу полімеризації.

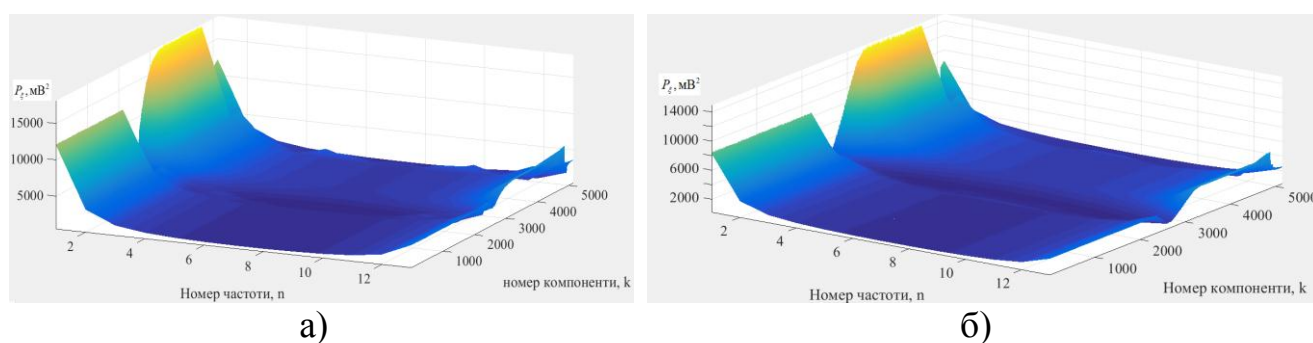


Рис. 10. Оцінки кореляційних компонент, почислені від реалізацій кореляційних функцій (рис. 9)

Отже, дослідивши електричний зонд-сигнал змодифікованим синфазним методом, отримано інформативні ознаки сигналу – кореляційні компоненти (рис. 10), які є інваріантними у часі, і поряд з тим виявляють локалізацію розподілу потужності сигналу на певних частотах. Отримані інваріанти показують однорідність властивостей сигналу, і поряд з тим зміни, за характером і значеннями яких можна оцінити динаміку процесу полімеризації стоматологічного реставраційного матеріалу.

Для тестування методу опрацювання електричних зонд-сигналів і, відповідно, алгоритмів та програмного забезпечення фотополімеризаторів, розроблено імітаційну модель сигналу, що враховує у своїй структурі основні параметри динаміки процесу полімеризації стоматологічного матеріалу. За основу побудови імітаційної моделі використано мультиплікативну суміш детермінованого та стаціонарного випадкового процесу. При цьому, детермінованим процесом буде послідовність прямокутних імпульсів, а стаціонарним випадковим процесом – зміна параметрів вершин цих імпульсів, що характеризує протікання процесу полімеризації в часі. Така модель подана у вигляді періодичного повторення перехідного процесу з періодом, що відповідає періоду опромінення стоматологічного матеріалу УФ-випромінюванням:

$$x(t + nT) = \begin{cases} S(t) \cdot l(t) + k & t_1 + nT < t \leq t_2 + nT \\ 0 & t_2 + nT < t \leq t_3 + nT \end{cases}, n = 0, 1, 2, \dots, 24, \quad (4)$$

де T – період опромінювання стоматологічного матеріалу імпульсами УФ-випромінювання, $S(t)$ – функція, що визначає форму перехідного процесу, k – постійна складова імпульсів електричного зонд-сигналу, $l(t)$ – функція, що задає тренд зміни вершини імпульсів.

В результаті опрацювання реалізацій зімітованого електричного зонд-сигналу синфазним методом встановлено, що інформативні ознаки, почислені для зімітованого та експериментально відібраного сигналу показали їх подібність та можливість застосування методу імітаційного моделювання для тестування програмного забезпечення блока контролю процесу полімеризації стоматологічного матеріалу промислових фотополімеризаторів.

На основі обґрунтованої математичної моделі та методу опрацювання електричного зонд-сигналу розроблено пакет комп'ютерних програм для статистичного опрацювання такого роду сигналів, як складової частини спеціалізованого програмного забезпечення окремого модуля стоматологічних фото полімеризаторів.

У **додатках** наведено тексти програм, розроблені для ПК (ОС Windows 10 Pro), акти впровадження результатів дисертаційного дослідження.

ВИСНОВКИ

У дисертації розв'язано актуальну наукову задачу обґрунтування математичної моделі електричного зонд-сигналу, яка має засоби врахування ознак протікання процесу полімеризації стоматологічного реставраційного матеріалу в часі, а також обґрунтування на її основі інформативних ознак сигналу та методу їх

розрахунку для задачі визначення динаміки стану стоматологічного реставраційного матеріалу.

При цьому отримано такі результати:

1. Розроблено метод неруйнівного контролю полімеризації стоматологічного матеріалу за електричним зонд-сигналом, що є результатом відбиття від поверхні стоматологічного матеріалу УФ-випромінювання, оцінки зміни інтенсивності якого є індикаторами динаміки стану стоматологічного реставраційного матеріалу;

2. Сформульовано основні вимоги до математичної моделі електричного зонд-сигналу, зокрема врахування періодичності структури такого роду сигналів (є результатом періодичного опромінювання стоматологічного матеріалу УФ-випромінюванням), можливості візуалізації випадкової складової (визначається просторовою та кількісною неоднорідністю нанесеного стоматологічного матеріалу, впливами зовнішніх та внутрішніх чинників) і можливість оцінювання змін у часово-фазовій структурі таких сигналів (є необхідним для визначення часу закінчення процесу полімеризації та оцінювання його динаміки).

3. Обґрунтовано математичну модель електричного зонд-сигналу у вигляді імпульсного періодично корельованого випадкового процесу, яка задовольняє зазначені вимоги.

4. Обґрунтовано моменти часу закінчення процесу полімеризації стоматологічного матеріалу та критерії, що ґрунтується на оцінюванні дисперсії електричного зонд-сигналу в межах ковзного вікна. Для оцінювання динаміки стоматологічного процесу змодифіковано алгоритм синфазного методу статистичного опрацювання електричних зонд-сигналів шляхом введення блока задання значення періоду корельованості.

5. Установлено, що варіація оцінок дисперсії електричного зонд-сигналу в межах ковзного вікна є чутливою до зміни стану стоматологічного процесу, а отримані значення кореляційних компонент є характеристиками інформативно-інваріантних ознак електричного зонд-сигналу та відображають зміни динаміки стану стоматологічного реставраційного матеріалу.

6. Розроблено пакет комп'ютерних програм статистичного опрацювання електричних зонд-сигналів, базуючись на застосуванні алгоритму змодифікованого синфазного методу, який придатний для використання як складової частини спеціалізованого програмного забезпечення окремого модуля (автоматизованого контролю) стоматологічних фото полімеризаторів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Праці, в яких опубліковано основні наукові результати

1. Никитюк В. В., Дедів Л. Є., Хвостівський М. О. Метод комп'ютерного оцінювання міцності стоматологічного матеріалу за фотоелектричним сигналом. *Вісник Сумського державного університету. Технічні науки*. 2012. № 2. С. 182–188. (індексується у *Google Scholar*).

2. Драган Я. П., Никитюк В. В., Хвостівська Л. В. Математична модель фотоелектричного сигналу полімеризації стоматологічного матеріалу у вигляді

імпульсного періодичного корельованого випадкового процесу. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Комп'ютерні науки та інформаційні технології*. 2013. № 771. С. 146–149.

(індексується у *Index Copernicus, Google Scholar*).

3. Никитюк В. В., Дозорський В. Г., Шадріна Г. М. Обґрунтування структури системи відбору фотоелектричних сигналів для визначення ступеня полімеризації стоматологічного матеріалу. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2014. № 2. С. 189–192.

(індексується у *Index Copernicus, Google Scholar, Polish Scholarly Bibliography*).

4. Драган Я. П., Никитюк В. В., Паляниця Ю. Б. Енергетично-сигнальна концепція визначення стану технологічного стоматологічного процесу як енергоактивного об'єкта. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Комп'ютерні науки та інформаційні технології*. 2015. № 826. С. 368–372.

(індексується у *Index Copernicus, Google Scholar*).

5. Nykytyuk V., Dozorskyi V., Dozorska O. Detection of biomedical signals disruption using a sliding window. *Scientific journal of the Ternopil National Technical University*. 2018. № 3 (91). P. 125–133.

(індексується у *Index Copernicus, Google Scholar*).

6. Nykytyuk V. V. Mathematical model of electric zond-signal for determination of the state of the resistant dental process. *Danish scientific journal. Technical sciences*. 2018. № 10–1. P. 48–54.

(індексується у *International Innovative Journal Impact Factor (IIJIF), Directory of Indexing and Impact Factor (DIIF), Scientific Indexing Services (SIS)*).

7. Dragan Y. P., Nykytyuk V. V., Palaniza Y. B. The research object mathematical model substantiation for physical and technical sciences as result, in particular, in the case of a power-activated object with a regulated activator system analysis. *Znanstvena misel journal. Technical sciences*. 2018. № 19. Vol. 1. P. 42–47.

(індексується у *eLibrary, International Innovative Journal Impact Factor (IIJIF), Directory of Indexing and Impact Factor (DIIF), Scientific Indexing Services (SIS), International Scientific Indexing (ISI), Cite Factor (Academic Scientific Journal)*).

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

8. Никитюк В. В., Шадріна Г. М. Моделювання процесу затвердіння фотополімерного пломбувального матеріалу. Збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» (м. Тернопіль, 21–22 грудня 2010 р.). Тернопіль, 2010. С. 8.

9. Дедів Л. Є., Никитюк В. В., Хвостівський М. О. Метод оцінювання стоматологічного матеріалу за зміною оптичних характеристик під час його полімеризації. XI Міжнародна наукова конференція «Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об'єктів» (м. Кременчук, 2–4 листопада 2012 р.). Кременчук, 2012. С. 105.

10. Никитюк В. В. Математична модель фотоелектричного сигналу полімеризації стоматологічного матеріалу. Сборник научных трудов SWorld Материалы международной научно-практической конференции «Современные

направления теоретических и прикладных исследований 2013» (м. Одесса, 19–30 марта 2013 р.). Одесса, 2013. Том 10-1. С. 55–56.

11. Никитюк В. В., Хвостівський М. О. Математична модель фотоелектричного сигналу полімеризації стоматологічного матеріалу. Матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції «*Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування*» (м. Тернопіль 5–6 червня 2013 р.). Тернопіль, 2013. С. 26–29.

12. Никитюк В. В. Алгоритм реалізації синфазного методу опрацювання фотоелектричного сигналу. Збірник тез доповідей XVII наукової конференції «*Природничі науки та інформаційні технології*» (м. Тернопіль, 20–21 листопада 2013 р.). Тернопіль, 2013. С. 39.

13. Никитюк В. В., Дозорський В. Г. Система відбору фотоелектричних сигналів для визначення степені полімеризації стоматологічного матеріалу. International periodic scientific journal «*МИР Науки и инноваций*» (м. Иваново, 21–30 апреля 2015 р.). Иваново, 2015. Том 2-1. С. 43–45.

14. Драган Я. П., Никитюк В. В. Процедура визначення стану технологічного, стоматологічного процесу як енергоактивного об'єкту. Матеріали II Всеукраїнської науково-технічної конференції «*Теоретичні та практичні аспекти радіотехніки і приладобудування*» (м. Тернопіль, 9–10 червня 2015 р.). Тернопіль, 2015. С. 76–78.

15. Драган Я. П., Никитюк В. В. Математична модель електричного зонд-сигналу для визначення стану реставраційного стоматологічного процесу як енергоактивного об'єкту. Збірник тез доповідей VI Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів «*Актуальні задачі сучасних технологій*» (м. Тернопіль, 16–17 листопада 2017 р.). Тернопіль, 2017. Том 1. С. 94–95.

АНОТАЦІЯ

Никитюк В. В. Математична модель електричного зонд-сигналу для визначення динаміки стану реставраційного стоматологічного процесу. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – Математичне моделювання та обчислювальні методи. – Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Тернопіль, 2019.

У дисертації розв'язано актуальну наукову задачу обґрунтування математичної моделі електричного зонд-сигналу та розроблення методу його опрацювання, сформульованого базуючись на цій моделі, а також використання нових інформативних ознак динаміки стану процесу полімеризації стоматологічних матеріалів в часі.

Обґрунтовано нове застосування імпульсного періодично корельованого випадкового процесу як математичної моделі енергетичного зонд-сигналу, яка враховує у своїй структурі поєднання властивостей періодичності із випадковістю. Базуючись на обґрунтованій моделі модифіковано синфазний метод опрацювання енергетичного сигналу, що дає змогу оцінити динаміку стану полімеризації стоматологічного композитного матеріалу з метою визначення оптимального часу

експозиції. Установлено, що отримані значення кореляційних компонент, обчислені з допомогою змодифікованого синфазного методу, є інформативними ознаками енергетичного зонд-сигналу та характеризують процес полімеризації і спосіб обчислення оцінки достовірності отриманих результатів.

Ключові слова: електричний зонд-сигнал, періодично корельований випадковий процес, період корельованості, полімеризація, імітація, кореляційні компоненти, верифікація.

АННОТАЦИЯ

Никитюк В. В. Математическая модель электрического зонд-сигнала для определения динамики состояния реставрационного стоматологического процесса. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.05.02 – Математическое моделирование и вычислительные методы. – Тернопольский национальный технический университет имени Ивана Пулюя, Тернополь, 2019.

В диссертации решено актуальную научную задачу обоснования математической модели электрического зонд-сигнала и разработка метода его обработки, сформулированного основываясь на этой модели, а также использования новых информативных признаков динамики состояния процесса полимеризации стоматологических материалов во времени.

Обоснованно новое применение импульсного периодического коррелированного случайного процесса как математической модели электрического зонд-сигнала, которая учитывает в своей структуре сочетание свойств периодичности с случайностью. Основываясь на обоснованной модели модифицированного синфазного метода обработки электрического зонд-сигнала, что позволяет оценить динамику состояния полимеризации стоматологического материала с целью определения оптимального времени экспозиции. Установлено, что полученные значения корреляционных компонент, вычисленные с помощью модифицированного синфазного метода, являются информативными признаками электрического зонд-сигнала и характеризует процесс полимеризации.

Ключевые слова: электрический зонд-сигнал, периодически коррелированный случайный процесс, период коррелированности, полимеризация, имитация, корреляционные компоненты, верификация.

ANNOTATION

Nykytyuk V. V. Mathematical model of electrical zond-signals for the estimation of state dynamics in a dental technological process. – Manuscript.

Thesis for Candidate Degree of Technical Science on specialty 01.05.02 – Mathematical modelling and computation methods. – Ternopol Ivan Puluj National technical University, Ternopil, 2019.

The actual science problem for mathematical model reasoning of electrical zond-signals and working out the method of its processing based on this model has been solved in the thesis, and, as well, utilizing of new informative indicators of the process of a dental

materials polymerization dynamics state in time. The object of research is process of electrical zond-signals modelling. The subject of the research is the mathematical model of electrical zond-signals, features and possibilities which it assures during the problem solving of visualization of the process of a dental materials polymerization dynamics state.

The dynamics of the process has been described and the peculiarity of the visualization problem of the dynamics state for a process of dental materials polymerization on the base of electrical zond-signals. The main types of light solidification materials that are utilized in restorative stomatology, particularly for the plugs making (photo polymeric (light solidification) materials are most expanded, for which the reaching of certain physical and mechanical parameters during polymerization is a result of radiation with wave length of 380 – 500 nm) have been analyzed. It is necessary to working out a method of mediated assessment and visualization of a dental materials polymerization dynamics state for assurance of certain parameters of dental material and for increasing of radiation harm for oral cavity.

The method of dental materials polymerization process visualization has been offered that is based on the main statements of system-signal concept according to which the performance of a system may be assessed by means of independent processing of a signal that is a result of this system work, and on the base of concept of energy activity that considers as the central an energy active object (a system) that has such features as initiation, activation, catalyzation by specific action of energy carrier. The "energy division" on such energy that is required for support of system activity and on other one that is spent for a creation of a signal about system state and for energy assurance of data carrying about it is a significant in the signal creation.

The substantiation of the structure and technical characteristics of the system of selection of electrical probe signals has been carried out. On the basis of a substantiated mathematical model in the form of a pulse PKVP that takes into account in its structure the stochastic interconnection between the various responses of the same series of observations and the substantiation of the informative signals of the signal and the method of their calculation for solving the problems of the operative and reliable detection of the change in the polymerization process. The common-mode method of statistical processing of such signals is considered and new expressions are obtained for the calculation of statistical estimates of their characteristics.

The practical value of obtained results of the dissertation research is concluded in the modification of synphase processing method algorithm on the base of reasoned mathematical model of electrical zond-signals, that give possibility to detect informative indicators of a dental material polymerization process for automated control of the exposition time. Obtained practical results are suitable for utilization during the design of dental photopolymer irradiators with the function of automated control of exposition. This is the actual and important, practically useful result of the work that gives possibility to assure the reach of certain characteristics of a polymerization process.

Key words: electrical zond-signals, periodically correlated random processes, period of correlation, polymerization, imitation, correlational components, verification.

Підписано до друку 25.04.2019 р.

Формат 60×90 Папір ксероксний.

Обл. вид. арк. 0,9

Наклад 100 прим. Зам. № 3191.

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя.

46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56.

E-mail: vydavnytstvo@tu.edu.te.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 4226 від 08.12.11.