

ПРИЛАДОБУДУВАННЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА

УДК 681.7.068

М.О. Денисов

СХЕМО-ТЕХНІЧНІ КРИТЕРІЇ ЕФЕКТИВНОСТІ НЕЗОБРАЖУЮЧИХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ СИСТЕМ

The paper proposes the circuit criteria of NIFOS efficiency connected with the converter operators of energy and information system channels. We perform the analytical calculation of the proposed criteria by the ray-tracing method as well as by utilizing the specific software. These circuit criteria can be proposed as an instrument for NIFOS structural parametrical optimization. The use of proposed analytical circuit criteria allows not only promptly assessing the NIFOS technical realization efficiency, but also implementing the comparative analysis of competing NIFOS circuit designs.

Вступ

На сучасному етапі розвиток медицини високих технологій йде шляхом впровадження в клінічну практику мінімально інвазивних методів, спрямованих на досягнення максимального діагностично-лікувального ефекту при мінімальному негативному впливі на пацієнта. Використання оптичного випромінювання надає додаткові можливості сучасним технологіям мінімально інвазивної клінічної медицини (МІКМ). При цьому незображуючі волоконно-оптичні системи (НВОС), що забезпечують формування на поверхні біотканини або на певній її глибині густини потужності випромінювання, достатньої для досягнення діагностичного або лікувального ефекту, використовують істотні переваги методів доступу до ділянок внутрішніх органів пацієнта через природні порожнини або малорозмірні отвори, виконані хірургічним методом [1].

Узагальнена незображуюча волоконно-оптична система біомедичного призначення організаційно включає два канали: енергетичний та інформаційний. Зважаючи на цільове призначення, клінічні НВОС використовують одноканальну схему з лише енергетичним (хірургія, терапія) або інформаційним (моніторинг) каналом, тоді як двоканальна схема знайшла застосування в діагностичних і дослідницьких системах [2].

Ефективність діагностичних і лікувальних систем зазвичай визначається статистичними критеріями за результатами тривалого їх застосування в клінічній практиці. Клінічна ефективність діагностичних систем характеризується параметрами чутливості та специфічності, значення яких обчислюються за збігом досягнутих

результатів з відповідним “золотим стандартом діагностики” [3]. В хірургічних і терапевтичних системах клінічна ефективність визначається мірою ремісії пухлини (повної або часткової), відсотком рецидивів захворювання, відсутністю метастазування [4].

Зазначені критерії є результатом комплексної оцінки ефективності клінічного застосування всієї системи мінімально інвазивної клінічної медицини, але вони не дають відповідь щодо внеску незображуючої волоконно-оптичної системи в результуючий критерій ефективності. Більше того, критерії клінічної ефективності виключають порівняльний аналіз можливих варіантів технічної реалізації НВОС ще на стадії розробки системи.

Постановка задачі

Метою статті є визначення схемо-технічних критеріїв ефективності НВОС, які надавали б ще на стадії розроблення можливість порівняльного аналізу та оцінки ефективності конкуруючих схемних рішень незображуючих волоконно-оптичних систем для мінімально інвазивної клінічної медицини.

Критерії клінічної ефективності систем МІКМ і вимоги до схемо-технічних критеріїв

Аналіз загальноприйнятих в сучасній медицині критеріїв, що визначають клінічну ефективність систем МІКМ, дав можливість виділити серед них чотири групи, а саме: медико-технічні, медико-біологічні, часові та соціальні критерії (рис. 1).

До медико-технічних критеріїв можна віднести:

- глибину або діаметр некрозу біотканини (“операційна зона”);
 - ступінь термоураження біотканин;
 - мінімальний або максимальний енергетичний “порог” лікувальної або діагностичної процедури;
 - спектральний і динамічний діапазони реєстрації, а також мінімальний рівень корисного інформаційного сигналу;
 - спектральну та/або просторову роздільну здатність інформаційного сигналу.
- Медико-біологічні критерії охоплюють:
- ефективність лікування, що визначається ступенем повної або часткової ремісії;
 - наявність/відсутність метастазування;
 - вірогідність несанкціонованого ураження прилеглих біотканин;
 - можливість якісної диференціації результатів діагностики;
 - забезпечення біосумісності елементів НВОС, що безпосередньо контактують з біотканинами;
 - можливі обмеження доступу НВОС до досліджуваних біотканин;
 - можливу руйнацію оптичного дистального інструмента (ОДІ) під час лікувальної процедури та її наслідки.

- Часові критерії визначаються:
- загальною тривалістю діагностичної або лікувальної процедури;
 - часовими границями ефективного діагностичного або лікувального “вікна” (при застосуванні фотосенсибілізаторів);
 - терміном остаточного виведення фотосенсибілізатора з організму пацієнта.

Соціальні критерії оцінюють:

- доступність діагностичної або лікувальної процедури (її поширеність, вартість, вимоги до кваліфікації медичного персоналу);
- можливість амбулаторного застосування системи МІКМ;
- покращення умов життя неоперабельних хворих.

Конкретні технічні реалізації незображуваних волоконно-оптичних систем опосередковано впливають на критерії клінічної ефективності систем МІКМ. З урахуванням цього схемно-технічні критерії ефективності НВОС мають забезпечувати:

- оптимальність або раціональність вибраного схемного рішення для розв’язання конкретної задачі МІКМ;
- можливість оптимізації окремих складових блоків та елементів НВОС;
- можливість об’єктивного порівняння конкуруючих схемних рішень НВОС для МІКМ.

Залежно від цільового призначення схемно-технічні критерії безпосередньо впливають на економічну ефективність застосування НВОС, яка напряму пов’язана з клінічною ефективністю систем МІКМ.

Схемно-технічні критерії ефективності НВОС

Згідно з базовими принципами математичного моделювання оптико-електронних систем перетворення вхідного параметричного поля сигналів (ППС) $S_{вх}(p)$ на вихідне ППС $S_{вих}(p)$ повністю описується перетворюючим оператором (ПО) системи $P_{ОЕС}$ [5]:

$$S_{вих}(p) = P_{ОЕС}\{S_{вх}(p)\}.$$

Аналогічно, кожний i -й перетворюючий елемент незображуваної волоконно-оптичної системи характеризується відповідним перетворюючим оператором P_i , що трансформує параметричне поле сигналів на його вході у відповідне вихідне ППС.

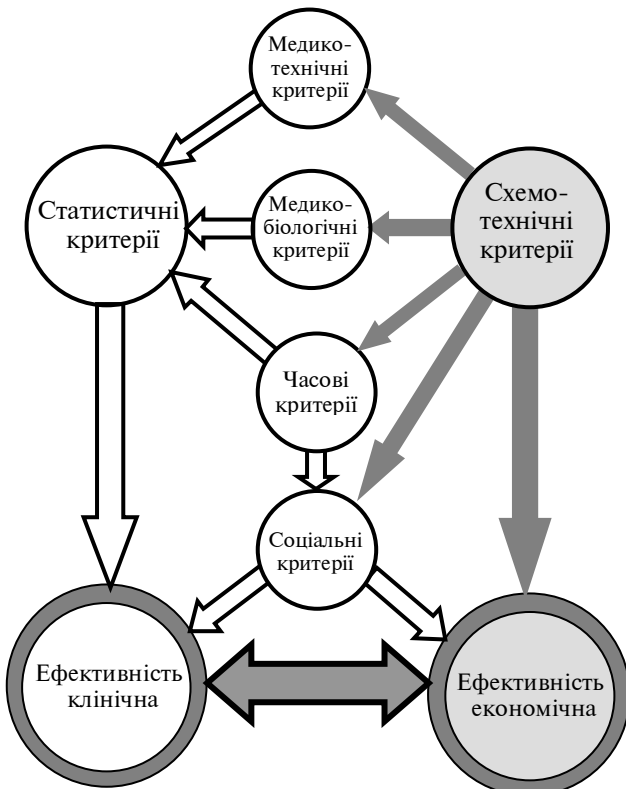


Рис. 1. Критерії ефективності систем МІКМ

В загальному вигляді перетворюючі оператори енергетичного та інформаційного каналів, відповідно P_E і P_I , є композицією перетворюючих операторів оптичних елементів, що входять до цих каналів [2], а саме: оптичної системи спряження джерела випромінювання з опромінюючою волоконно-оптичною транспортуючою системою (ВОТС) P_E^C ; опромінюючого (енергетичного) та приймального (інформаційного) каналів ВОТС (P_E^F і P_I^F); опромінюючого та приймального каналів ОДІ (P_E^T і P_I^T), спряжених з відповідною ВОТС, та оптичної системи спряження приймальної ВОТС з модулем аналізу інформаційного сигналу – P_I^C [6]:

$$P_E = P_E^C \cdot P_E^F \cdot P_E^T,$$

$$P_I = P_I^C \cdot P_I^F \cdot P_I^T.$$

Перетворюючі оператори енергетичного та інформаційного каналів, як у цілому, так і їх окремі перетворюючі елементи, можуть бути використаними для порівняльної оцінки конкуруючих схемних рішень незображуючих оптико-електронних систем медичного застосування. З цією метою були запропоновані такі аналітичні сфо-технічні критерії ефективності НВОС [7–9]:

- коефіцієнт оптичної ефективності енергетичного каналу, приведений до вихідної поверхні ОДІ (ТОЕ – tip optical efficiency):

$$T_{EF} = P_E;$$

- коефіцієнт оптичної ефективності збирання інформаційного сигналу (GEO – gathering optical efficiency):

$$G_{EF} = P_I;$$

- коефіцієнт оптичної ефективності результуючого інформаційного сигналу (SOE – sensor optical efficiency):

$$S_{EF} = P_E \cdot P_I;$$

- коефіцієнт оптичної ефективності спряження інформаційного та енергетичного каналів (COE – coupling optical efficiency):

$$C_{EF} = (P_I^T \cdot P_I^F) / (P_E^T \cdot P_E^F);$$

- коефіцієнт збільшення густини потужності оптичного випромінювання на виході енергетичного каналу (MDE – power density magnification):

$$M_{EF} = P_E \cdot (S_{fe} / S_D),$$

де S_{fe} і S_D – відповідно площі вихідної поверхні ВОТС енергетичного каналу та ОДІ, що безпосередньо контактує з біотканиною;

- коефіцієнт ефективної дистанційної густини потужності (PDE – distant power density efficiency):

$$K_{EF}(z) = P_E / S_T(z),$$

де $S_T(z)$ – площа опромінюваної ділянки біотканини на відстані z від вихідної поверхні ОДІ в енергетичному каналі, яка для контактного дистального інструмента становить

$$S_T(0) = S_D.$$

Пропонується узагальнений аналітичний вираз для визначення перетворюючого оператора P_j схемного рішення НВОС, що складається з N послідовно розміщених перетворюючих елементів:

$$P_j = \prod_{i=1}^N \tau_i \cdot (k_{\Sigma})_i = \prod_{i=1}^N \tau_i \cdot (k_{\sigma})_i \cdot (k_S)_i,$$

де τ_i – коефіцієнт пропускання i -го перетворюючого елемента; k_{Σ} – загальний коефіцієнт оптичних втрат внаслідок неузгодженості перетворюючих елементів схемного рішення НВОС; k_{σ} – коефіцієнт оптичних втрат внаслідок неузгодженості кутових апертур послідовно розміщених перетворюючих елементів; k_S – коефіцієнт оптичних втрат внаслідок діафрагмування, екранування та схеми пакування волокон ВОТС.

Аналітичне обчислення перетворюючих операторів і, як наслідок, відповідних сфо-технічних коефіцієнтів ефективності T_{EF} , S_{EF} , C_{EF} , G_{EF} , $K_{EF}(z)$, M_{EF} виконується з використанням спеціалізованого програмного забезпечення (Scalpel і SPERA) під час розрахунку незображуючих волоконно-оптичних систем рейтрейсинговим методом [7–9].

Приклади застосування запропонованих сфо-технічних критеріїв на стадії розроблення для порівняльного аналізу та оцінювання ефективності незображуючих волоконно-оптичних систем з оптичним дистальним інструментом контактної та безконтактної дії [10] подано на рис. 2. В першому випадку оцінювання конкуруючих систем для флуоресцентної діагностики здійснюється з використанням коефіцієнта оптичної ефективності резуль-

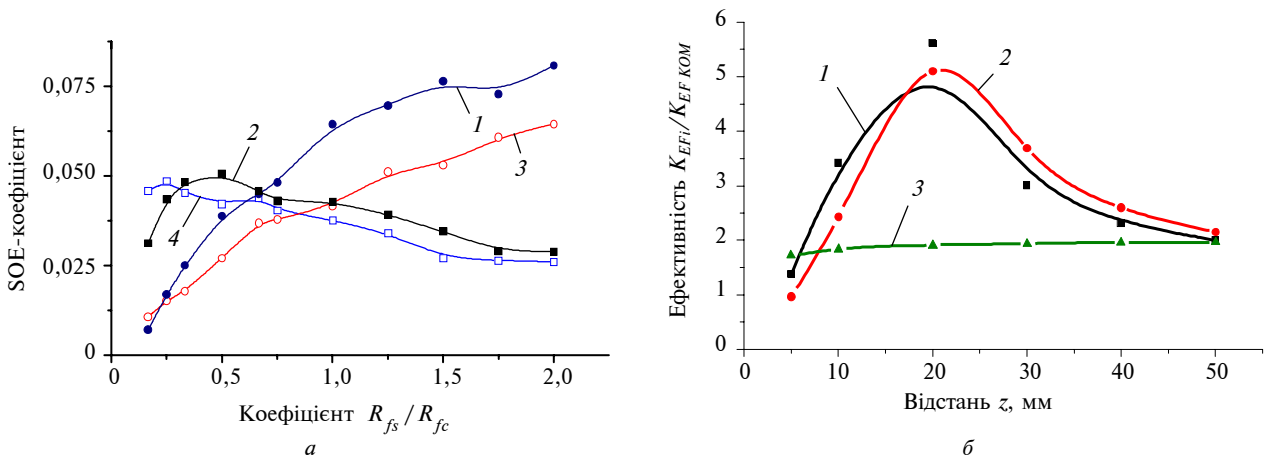


Рис. 2. Порівняння розроблених НВОС клінічного застосування з використанням запропонованих сємо-технічних критеріїв: а – контактні ОДІ для флуоресцентної діагностики [8]: ●, ■ – ОДІ TPS 3,76-12-0,22-*k*, ○, □ – TPS 5,72-8-0,2-*k*; 1 і 3 – сємоне рішення $Ab + mT$ [11]; 2 і 4 – сємоне рішення $Va + mT$ [11]; б – неконтактні ОДІ для термотерапії простати [9]: 1 – SBQ-0613A; 2 – UTQ-0613A; 3 – SBS-0613W

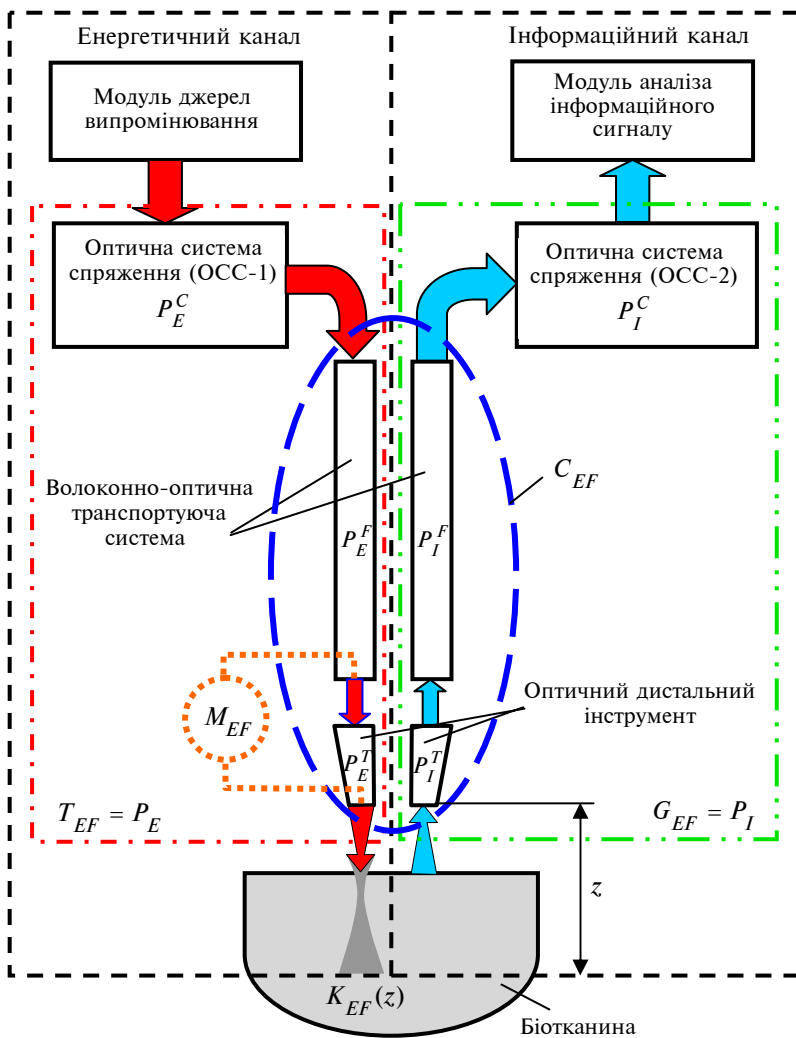


Рис. 3. Сємо-технічні критерії ефективності НВОС для МІКМ

туючого інформаційного сигналу SOE. В другому випадку порівняння ефективності розроблених НВОС з їх комерційним аналогом – системою SideFire (Murglase, США), виконується за відношенням їх коефіцієнтів ефективної дистанційної густини потужності.

У загальному вигляді зв'язок запропонованих сємо-технічних критеріїв з перетворюючими операторами елементів незображуючої волоконно-оптичної системи для мінімально інвазивної клінічної медицини подано на рис. 3.

Слід зазначити, що сємо-технічні критерії T_{EF} , $K_{EF}(z)$, M_{EF} переважним чином застосовуються для оцінювання ефективності хірургічних і терапевтичних систем МІКМ, тоді як критерії S_{EF} , C_{EF} , G_{EF} призначені для порівняльного аналізу конкуруючих сємоних рішень НВОС для діагностики, моніторингу та лабораторних досліджень.

Висновки

Застосування запропонованих аналітичних сємо-технічних критеріїв дає можливість не тільки оперативно оцінювати ефек-

тивність конкретної технічної реалізації незображуючої волоконно-оптичної системи для МІКМ як у цілому, так і її окремих елементів, але й здійснювати порівняльний аналіз конкуруючих схемних рішень НВОС.

Подальші дослідження мають бути спрямованими на застосування схемо-технічних критеріїв як інструмента структурно-параметричної оптимізації НВОС з урахуванням її цільового застосування в системах мінімально інвазивної клінічної медицини.

1. *Biomedical Photonics Handbook* / Ed. Tuan Vo-Dinh. – Florida: CRC Press, 2003. – 1864 p.
2. Денисов М.О. Класифікація волоконно-оптичних систем для мінімально інвазивної клінічної медицини // Вісник НТУУ “КПІ”. Сер. Приладобудування. – 2006. – № 32. – С. 146–152.
3. *Wagnieres G.A., Star W.M., Wilson B.C. In vivo Fluorescence Spectroscopy and Imaging for Oncological Applications* // *Photochemistry and Photobiology*. – 1998. – 68, N 5. – P. 603–632.
4. *Vakulovskaya E.G. Photodynamic therapy and fluorescence diagnostics of head and neck cancer with second-generation photosensitizers* // *Proc. SPIE*. – 2005. – 5973. – P. 65–70.
5. *Мосягин Г.М., Немтинов В.Б. Преобразование сигналов в оптико-электронных приборах систем управления летательными аппаратами*. – М.: Машиностроение, 1980. – 176 с.
6. Денисов М.О. Фізичні аспекти математичного моделювання взаємодії оптичного випромінювання з біотканинами // Оптико-електроні інформаційно-енергетичні технології. – 2011. – № 1 (21). – С. 76–81.
7. *Denisov N.A., Griffin S.E. Contact fiber probes for in-vivo optical spectroscopy: comparative analysis* // *Proc. SPIE*. – 1998. – 325. – P. 44–55.
8. *Denisov N.A. Comparison of competing fiber optic probes for tissue fluorescence analysis* // *Ibid.* – 2000. – 4161. – P. 234–243.
9. *Denisov N.A., Griffin S.E. Optimization of the non-contact fiber delivery systems for clinical laser applications* // *Ibid.* – 2002. – 4609. – P. 148–158.
10. Денисов М.О. Оптичний дистальний інструмент для мінімально інвазивної клінічної медицини // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2011. – № 1. – С. 124–128.
11. Денисов М.О. Системний підхід до розробки волоконно-оптичного інструмента клінічного застосування // Вісник НТУУ “КПІ”. Сер. Приладобудування. – 2007. – № 33. – С. 139–146.

Рекомендована Радою
приладобудівного факультету
НТУУ “КПІ”

Надійшла до редакції
6 вересня 2011 року