

Поліщук С.Т. к.т.н., Балабанович Г. В., Івченко П.О. (НАУ, Україна)

БІОТЕХНІЧНА СИСТЕМА МЕДИЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ ІЗ ЗАМКНУТИМ КОНТУРОМ УПРАВЛІННЯ

Аналізуються гемодіалізна біотехнічна система, приладом керування якої є апарат «штучна нирка», об'єктом керування – пацієнт із порушенням діяльності функції нирки. Доводиться, що сучасні гемодіалізні системи побудовані за розімкнутою схемою управління. Синтезується структура гемодіалізної системи із замкнутим контуром управління.

Апарат «штучна нирка» (АШН) є технічною складовою гемодіалізної системи (ГДС), яка, виходячи із сучасних уявлень, може розглядатися як автоматизована система управління технологічним процесом екстракорпорального заміщення втраченої функції нирки хворої людини - гемодіалізом.

В разі виникнення термінальних стадій хвороби нирки (ТСХН), гемодіаліз може подовжувати життя людини на десятки років. Однак, тривалість життя та кошторис лікування знаходяться в прямій залежності від ефективності виконання гемодіалізу.

Ефективність виконання гемодіалізу, в свою чергу, визначається ступінню досягнення максимального значення гемодіалізного індексу дози (ГІД)- Kt/V . ГІД залежить від параметрів керування АШН які встановлює, і може змінювати у процесі проведення гемодіалізу лікар-оператор в залежності від стану пацієнта.

Світовий досвід показує, що спроба досягнення максимально можливих значень ГІД в умовах обмеження часу, навіть з використання найсучасніших АШН, не дає змоги уникнути порушення гомеостазу пацієнтів на різних етапах проведення процедури.

С технічної точки зору порушення гомеостазу організму людини можна пояснити, якщо розглянути ГДС як біотехнічну систему (БТС) [1], об'єктом керування якої є пацієнт із ТСХН, приладом керування є АШН, ланкою оптимізації у колі зворотного зв'язку є лікар-оператор, а цільовою функцією - корекція рідинного складу організму пацієнта (рис.1). З наведеної структурної схеми видно, що сучасна ГДС є системою розімкнутого типу, тому що у ній відсутні прямі інформаційні зв'язки між об'єктом керування і обчислювачем ГДС, а отже і не передбачені алгоритми утримання параметрів вектору стану об'єкта керування у допустимих межах, які визначаються особливостями фізіологічної системи організму пацієнта.

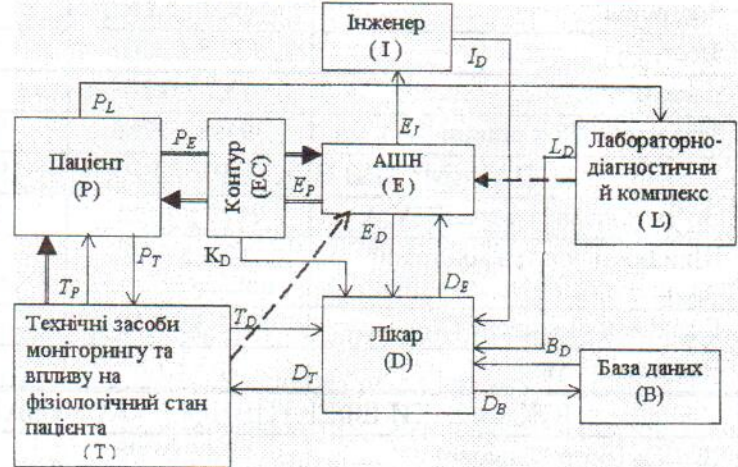


Рис. 1. Структурно-інформаційна схема сучасної гемодіалізної системи

- - речовинні зв'язки,
- - - - - інформаційні зв'язки;
- ⋯ - відсутні інформаційні зв'язки.

Сучасна концепція оцінки ефективності гемодіалізу визначається нерівністю

$$D = \frac{Kt}{V_p} \geq 1.2 \quad (1)$$

де K – показник ефективності органу керування;

V_p – інтегральний показник складності об'єкту керування;

t – ефективний час процесу керування.

Аналіз двох гемодіалітичних відділень м. Києва показав, що, не зважаючи на використання найсучасніших технічних засобів, більш ніж у 80% випадків ефективність управління у ГДС нижче мінімально припустимого граничного значення $D=1,2$ (див. рис.2, табл.1.).

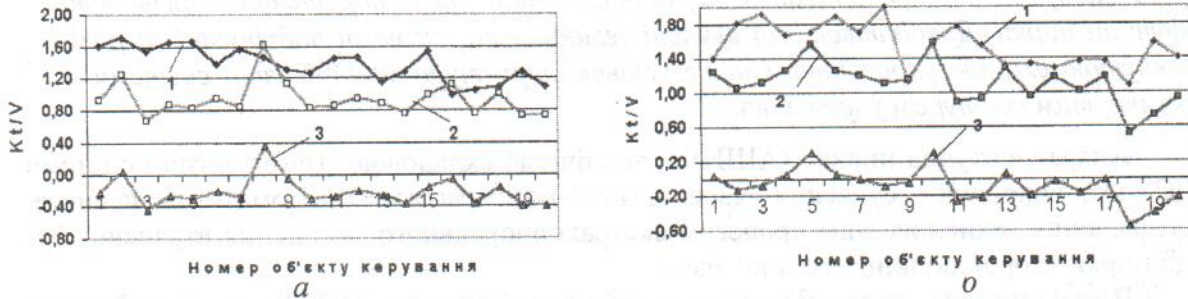


Рис 2. Оцінка ефективності керування у ГДС:
а) КОКЛ №1 м. Києва; б) третя лікарня м. Києва;
1- розрахункове значення D; 2 - реально отримане значення D; 3 - відносне відхилення D від граничного значення 1,2

Таблиця 1

Статистичні дані ефективності керування у ГДС

Порівняльні параметри	Лікарня №3	КОКЛ №1
	Довірчий інтервал $\alpha = 0,05$	Довірчий інтервал $\alpha = 0,05$
ПАРАМЕТРИ ОБ'ЄКТУ КЕРУВАННЯ		
Вік, років	46,0 ± 5,26	38,5 ± 5,00
Зріст, см	173,8 ± 3,51	166,9 ± 4,21
Вага, кг	73,1 ± 6,27	67,1 ± 4,21
Загальний об'єм рідини (V_p), мл	39498 ± 2786	37101 ± 2413
ПАРАМЕТРИ ВЕКТОРУ КЕРУВАННЯ		
Об'єм ультрафільтрації (V_{uf}), мл	2620 ± 402,1	2745 ± 271,5
Швидкість ультрафільтрації (Q_{uf}), мл/хв	10,4 ± 1,59	11,0 ± 1,28
Ефективний кліренс (K_E), мл/хв	211,3 ± 8,59	222,5 ± 9,73
Час діалізу, хв	253 ± 7,8	254 ± 3,3
ПОКАЗНИКИ ЕФЕКТИВНОСТІ КЕРУВАННЯ		
(Kt/V) _R (розрахункове)	1,38 ± 0,098	1,54 ± 0,114
Kt/V_L (лабораторне)	0,94 ± 0,096	1,11 ± 0,109
КОРЕЛЯЦІЙНИЙ АНАЛІЗ		
Коефіцієнт кореляції розрахунковий між V_p і (Kt/V)	-0,785	-0,565
Коефіцієнт кореляції лабораторний між V_p і (Kt/V)	-0,263	-0,565

Для подальшого аналізу причин низької ефективності процесу керування, на основі структурно-інформаційної схеми ГДС (рис.1) була розроблена інформаційна модель процесу управління у ГДС. Інформаційна модель дала змогу описати процес управління у системі як взаємодію інформаційних масивів в часі [2]:

$$D(t) = \{P_1(t), P_2(t), P_3(t), P_4(t), P_5(t), P_6(t), P_7(t)\}, \quad (2)$$

де $P_1(t)$ – інформаційний масив відхилення поточних біохімічних показників вектору стану об'єкту керування від оптимальних значень;

$P_2(t)$ – інформаційний масив відхилення поточних фізіологічних показників об'єкту керування від оптимальних;

$P_3(t)$ – інформаційний масив стану систем АІІН;

$P_4(t)$ – інформаційний масив стану технічних засобів контролю і впливу на параметри вектору стану об'єкту керування;

$P_5(t)$ – інформаційний масив відхилення поточних значень цільової функції процесу від оптимальних

$P_6(t)$ – інформаційний масив поточних значень параметрів вектору керування;

$P_7(t)$ – інформаційний масив відхилення поточних значень вектору керування від оптимальних.

Розроблена цільова функція процесу управління (ЦФПУ) у ГДС $\Psi(t)$.

$$\Psi(t) = \begin{cases} \lim_{t \rightarrow t_k} M_i(t) = 0, & i = 1, 2, \dots, m, \\ \lim_{t \rightarrow t_k} C_j(t) = C_{j_{opt}}, & j = 1, 2, \dots, m, \\ \lim_{t \rightarrow t_k} V(t) = V_{opt}, \\ \lim_{t \rightarrow t_k} pH(t) = pH_{opt}, \\ (B_y - \Delta) < \lim_{t \rightarrow t_k} B_y(t) < (B_y + \Delta). \end{cases} \quad (3)$$

При цьому, максимальне значення Ψ_{max} може досягатись, якщо швидкість зміни варіюваних величин $W^{(i)}$ не перевищує границь фізіологічно допустимих значень:

$$\left| \frac{dM_i(t)}{dt} \right| \leq \max W_i^{(M)}, \quad \left| \frac{dC_i(t)}{dt} \right| \leq opt W_j^{(C)}, \quad \left| \frac{dV(t)}{dt} \right| \leq opt W^{(V)}, \quad \left| \frac{dpH(t)}{dt} \right| \leq opt W^{(pH)}, \quad (4)$$

де t_k - тривалість процесу керування; t - поточний момент часу M_i - маса i -ї токсичної речовини, яка видалена; $C_i(t), C_{i_{opt}}$ - поточне та оптимальне значення концентрації i -ї мінеральної речовини; $V(t), V_{opt}$ - поточне та оптимальне значення об'єму рідини в організмі; $pH(t), pH_{opt}$ - поточне та оптимальне значення кислотно-лужної рівноваги рідинного об'єму; B_y - концентрація y -ї амінокислоти, Δ - допустиме відхилення.

На відміну від прийнятої концепції оцінки ефективності, формула (1), розроблена ЦФПУ дає змогу кількісно аналізувати параметри вектору стану об'єкту керування та розраховувати значення параметрів вектору керування.

На основі аналізу інформаційних масивів (2) з урахуванням (1), (3), (4) було визначено загальний обсяг інформації, яку необхідно обробляти лікарю-оператору у ГДС:

$$H_{\Sigma} = H_{COI} + H_{ЗАП} + H_{РОЗ} + H_{ЛОГ} + H_{ПАМ} + H_{ДВ}, \quad (5)$$

де H_{COI} – кількість інформації, яку оператор одержав від системи відображення інформації;

$H_{ЗАП}$ – кількість інформації, яку необхідно запам'ятати;

$H_{РОЗ}$ – кількість інформації котра використовується при здійсненні не складних розрахунків (наприклад додавання, множення і т. ін.);

$H_{ЛОГ}$ – кількість інформації, яка використовується при перевірці умов логічного характеру;

$H_{ПАМ}$ – кількість інформації, яка необхідна для прийняти рішення з залученням додаткових даних, які знаходиться в пам'яті оператора;

$H_{ДВ}$ – додаткова інформація, яка використовується оператором при залученні органів керування.

Сумарний час обробки лікарем-оператором всієї інформації

$$\tau = \sum_{i=1}^6 \frac{H_i}{U_i}, \quad (6)$$

де H_i – кількість інформації i -го виду, яка обробляється при вирішенні задачі;
 U_i – швидкість обробки інформації i -го виду.

Результати розрахунків кількості інформації, яку необхідно обробляти лікарю-оператору за формулою (6) показали, що загальний час τ , який потрібний лікарю-оператору для обчислення параметрів найпростіших алгоритмів управління, складає біля 7хв, а час виходу параметрів вектору стану об'єкта керування за допустимі межі може складати 5 хв і менше.

З точки зору теорії автоматичного регулювання ці результати можна інтерпретувати наступним чином. Сучасні ГДС не можуть розглядатися як системи замкнутого типу, в якій взаємодіють три функціональних блока: пацієнт – об'єкт керування (ОК); АІШН-прилад керування (ПК); лікар-оператор – оптимізуюча ланка кола зворотного зв'язку (ЛЗЗ). Дійсно, якщо розглядати кожен функціональний блок ГДС як інерційну ланку з передатною функцією у вигляді $W_i(p) = e^{-p\tau_i}$, то $\tau_{ПК} \ll (\tau_{ОК} \approx \tau_{ЛЗЗ})$.

Для усунення цієї часової неузгодженості на основі біонічного підходу запропоновано структурну схему гемодіалізіної БТС, тобто БТС із можливістю адаптації параметрів вектору керування до фізіологічних особливостей конкретного пацієнта. Структурна схема розробленої БТС наведена на рис. 3.

Висновки. На відміну від ГДС розімкнутого типу запропонована БТС дозволяє більшість часу працювати в автоматичному режимі. Лікар-оператор в цьому випадку виступає лише як експерт. Функції експерта, за таких умов, у БТС наступні:

- попередній розрахунок даних для математичної моделі об'єкту керування;
- введення розрахованих вхідних даних у прилад керування БТС;
- контроль ефективності керування на етапі адаптації математичної моделі для конкретного індивіду (індивідуалізація математичної моделі об'єкту керування);
- корекція початкових даних у випадку невідповідності ефективності гемодіалізу;
- втручання в роботу БТС у випадку виникнення нештатної ситуації.

Список літератури

1. Новосельцев В.Н. Теория управления и биосистемы. Анализ сохрнительных свойств. – М.: Наука, 1978. – 320 с.
2. Поліщук С.Т. Інформаційні засоби підвищення ефективності керування у біотехнічній гемодіалізіній системі. Дис. канд. тех. наук. – Київ: 2004

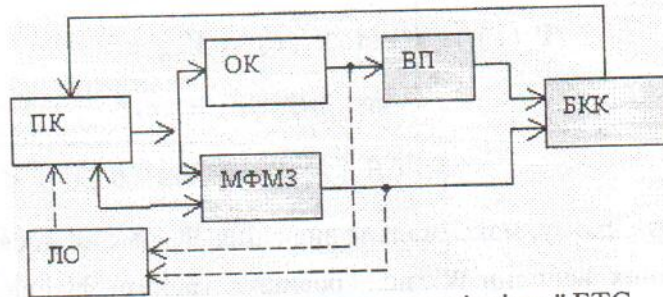


Рис.3. Структурна схема гемодіалізіної БТС із замкнутим контуром керування :

а) затемнені – нововведені структурні компоненти;

б) пунктиром зображено зв'язки на період адаптації ММОК;

ПК – прилад керування; ЛО – лікар-оператор; ОК – об'єкт керування; МФМЗ – модуль формування модельних значень; ВП – вимірювальний прилад; БКК – блок корекції