

УДК 681.542:681.5.015.3:616.61-78(045)

С.Т. Поліщук

ІНФОРМАЦІЙНІ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКИ СТРУКТУРНИХ КОМПОНЕНТІВ У БІОТЕХНІЧНІЙ СИСТЕМІ КОРЕКЦІЇ ГОМЕОСТАЗУ

Розглянуто гемодіаліз як процес екстракорпоральної нормалізації біохімічного складу рідинного об'єму організму людини в біотехнічній системі, структуру системи з погляду теорії автоматизованого управління, інформаційний опис, взаємозв'язки структурних компонентів системи та алгоритм її роботи.

Гемодіалізи відділення багатьох клінік західних країн і України оснащуються апаратами «штучна нирка» (АШН) фірм Гамбро (Швеція), Фрезенус (Німеччина), Бакстер (США) та ін. Незважаючи на широкий спектр модифікацій апаратів зазначених фірм, усі автоматизовані системи, побудовані на базі цих апаратів, за класифікацією В.М. Ахутіна можна віднести до напівавтоматичних систем, де оператор коректує параметри системи, виконуючи функції зворотного зв'язку в системі управління [1], за класифікацією С. Біра – до дуже складних біотехнічних систем (БТС), де діяльність оператора має складний інтелектуальний характер (розпізнавання образів, багатокординатне спостереження, прийняття рішень та ін.) [2].

Структура відділень гемодіалізу, методика його проведення, принципи побудови АШН дають можливість скласти узагальнену схему БТС екстракорпоральної нормалізації біохімічного стану (ЕНБС) організму пацієнта, прослідкувати інформаційні зв'язки між функціональними елементами системи та оцінити ефективність роботи її складових (рис. 1) [3; 4; 5].

Введення поняття ЕНБС зумовлене необхідністю глибшого розуміння процесу, який відбувається в ЕС при масообміні. Гемодіаліз у перекладі з грецької мови означає очищення крові. Але процес масообміну складається не тільки з видалення токсичних речовин із всього рідинного об'єму організму людини, а і з його іонної, кислотно-лужної регуляції. Нерозуміння цього може призвести до дуже великих помилок під час розрахунку дози гемодіалізу.

У сучасній гемодіалізній системі присутні всі структурні компоненти, які характерні для автоматизованої системи управління технологічним процесом (АСУТП): об'єкт управління Р, система підготовки лікування (виробництва) L, I, T, B, система контролю процесу лікування (технологічного процесу) T, L, орган управління ЕС, система управління Е (рис. 1).

Без технологічної карти процесу, технологічних допусків, моніторингу параметрів процесу неможливе серійне виробництво продукції відповідного стандарту, а в медицині – забезпечення якості лікування. Тому технологія проведення гемодіалізу потребує якісного управління технологічним процесом. На якість управління, якщо під цим розуміти відповідність необхідним параметрам одержуваних виробів, великий вплив чинить точність математичних моделей, які є базою для управління процесом. Основою для побудови математичних моделей є інформаційне середовище, яке спрямоване на виконання алгоритму управління фізичним процесом.

Під інформаційним середовищем розуміють інформацію, яка циркулює в середині АСУТП або надходить ззовні. Відсутність інформації в будь-який час або її помилковість може розглядатися як збурення, яке порушує технологічний процес. Тому точний опис кількості інформації, інформаційних зв'язків між структурними компонентами, шляхів пересування інформації в гемодіалізній системі є одним з перших і найважливіших кроків у подальшому розгляді технологічного процесу і побудови АСУТП [6].

Технологію проведення гемодіалізу можна поділити на два етапи. На першому, підготовчому, на основі аналізу інформації про стан пацієнта, технічних засобів, параметрів масообміну формується масив даних, числові значення елементів якого є кількісними значеннями параметрів екстракорпорального контуру. На другому етапі для виконання цільової функції ЕНБС відбувається підтримка фізичних параметрів екстракорпорального контуру системою управління технологічним процесом через розрахунок підготовчого етапу та їх корегування, якщо виникає необхідність.

На підготовчому етапі проведення гемодіалізу необхідно виконати такий алгоритм:

1) сформувати інформаційний масив біохімічного стану організму пацієнта BH_i , який з'являється в каналі зв'язку $L_D \Leftrightarrow D_B$ (рис. 1):

$$BH_i \in \left\{ Na^+, K^+, Ca^+, Mg^+, Cl^-, pH, M_\chi, G_l, H_t, V, Q \right\}_{i=15} \Big|_{\Leftrightarrow L_D}^{\Rightarrow D_B} \quad (1)$$

де « \Leftrightarrow », « \rightarrow » – концентрації іонів відповідних хімічних елементів; pH – кислотно-лужний стан крові; M_χ – концентрація маркерів токсичних речовин ($\chi = 5$: сечовина, креатинін, білірубін, вітамін B_{12} , β_2 – мікроглобулін), G_l – концентрація глюкози, H_t – гематокрит крові, V – загальний об'єм рідини в організмі, Q – осмолярність плазми крові;

2) сформувати інформаційний масив ΔBH ступеня відміни елементів масиву BH_i від оптимальних значень для даного пацієнта BH_i^{opt} , які зберігаються в базі даних:

$$\Delta BH_i \in \left\{ f_i(BH_i, BH_i^{opt}) \right\}_{i=15} \Big|_{\Leftrightarrow D_B}^{\Rightarrow D_B} \quad (2)$$

3) сформувати інформаційний масив фізіологічного стану пацієнта FS_j , який надходить до лікаря з каналу T_D :

$$FS_j \in \left\{ P_A, P_V, F_H, F_R, T_B, S_H, M_H \right\}_{j=7} \Big|_{\Leftrightarrow T_D}^{\Rightarrow D_B} \quad (3)$$

де P_A – систолічний тиск; P_V – диастолічний тиск; F_H – частота серцевих скорочень; F_R – частота дихання; T_B – температура тіла; S_H – показники стану нервової системи; M_H – маса тіла;

4) сформувати інформаційний масив ΔFS_j ступеня відміни елементів масиву FS_j від оптимальних значень FS_j^{opt} , які зберігаються в базі даних:

$$\Delta FS_j \in \left\{ f_j(FS_j, FS_j^{opt}) \right\}_{j=7} \Big|_{\Leftrightarrow D_B}^{\Rightarrow D_B} \quad (4)$$

5) визначити метод ЕНБС (гемодіаліз, гемодіафільтрація, гемосорбція, плазмоферез або їх комбінації) на основі аналізу масивів ΔBH_i та ΔFS_j за виразами (2), (4) для формування інформаційного масиву параметрів масообміну в екстракорпоральному контурі:

$$PM_\mu \in \left\{ \Delta BH_i \cap \Delta BH_j \cup S_m, K_D, K_{UF} \right\}_{\mu=15} \Big|_{\Leftrightarrow D_B}^{\Rightarrow D_B} \quad (5)$$

де S_m – площа мембрани діалізатора; K_D – кліренс діалізатора [7]:

$$K_D \geq \frac{1,2V}{t} \quad (6)$$

V – загальний об'єм рідини в організмі пацієнта; t – ефективний час проведення ЕНБС; K_{UF} – коефіцієнт ультрафільтрації мембрани діалізатора;

6) сформувати інформаційний масив про технічний стан АШН, який надходить до лікаря з каналів I_D, E_D :

$$AKE_\mu \in \left\{ v_b, v_d, v_u, w_u, p_a, p_v, w_b, c_d, p_d, t_d \cup K_D, A_S, Z_M, O_P, C_L \right\}_{\mu=15} \Big|_{\Leftrightarrow I_D, E_D}^{\Rightarrow D_B} \quad (7)$$

де характеристиками вимірювачів, які пов'язані з точністю підтримки параметрів керування, є швидкість потоку крові v_b , швидкість діалізуючого розчину v_d , швидкість ультрафільтрації v_u , об'єм ультрафільтрації w_u , тиск в артеріальній магістралі p_a , тиск у венозній магістралі p_v , об'єм діалізуючої крові w_b , концентрація діалізуючого розчину c_d , тиск діалізуючого розчину p_d , температура діалізуючого розчину t_d ; характеристиками стану аварійних систем є порушення цілості мембрани діалізатора K_D , присутність повітря у венозній магістралі A_S , перетиск венозної магістралі Z_M , відключення насоса крові O_P , вихід за допустимі межі точнісних параметрів C_L ;

7) сформувати інформаційний масив стану технічних засобів контролю і впливу (ТЗКВ), який надходить до лікаря по каналу T_D :

$$TEC_{\beta} \in \{P_V, F_H, F_R, T_B, M_B, S_N\}_{\beta=5} \Big|_{\Rightarrow D_B}^{\Rightarrow T_D}, \quad (8)$$

де технічними характеристиками працездатності ТЗКВ є судинний тиск P_V , частота серцевих скорочень F_H , частота дихання F_R , температура тіла T_B , маса тіла M_B , стан нервової системи S_N ;

8) сформувати інформаційний масив значень фізичних параметрів екстракорпорального контуру EC_{ξ} , виходячи з умови ефективності ЕНБС (6):

$$EC_{\xi} \in \{V_B, V_D, T_D, P_B, P_A, P_D, V_{UF}, W_{UF}, C_D\}_{\xi=8} \Big|_{\Leftarrow B_D}^{\Rightarrow D_B}, \quad (9)$$

де V_B – швидкість потоку крові; V_D – швидкість потоку діалізату; T_D – температура діалізату; P_B – тиск крові у веноній магістралі; P_A – тиск крові в артеріальній магістралі; P_D – тиск діалізуючого розчину; V_{UF} – об'єм ультрафільтрації; W_{UF} – швидкість ультрафільтрації, C_D – склад діалізуючого розчину.

Після аналізу масивів інформації (1)–(8) і прийняття рішення про можливість проведення ЕНБС дані масиву EC (9) заносять до пам'яті апарата E , що є закінченням підготовчого етапу (рис. 2, а).

На другому етапі проведення гемодіалізу цільова функція має вигляд [8]:

$$PFH = \begin{cases} \lim_{t \rightarrow t_k} Mi(t) = 0, & i = 1, 2, \dots, m; \\ \lim_{t \rightarrow t_k} Ci(t) = C_{opt_i}, & i = 1, 2, \dots, m; \\ \lim_{t \rightarrow t_k} V(t) = V_{opt}; \\ \lim_{t \rightarrow t_k} pH(t) = pH_{opt}; \\ (B_y - \Delta) < \lim_{t \rightarrow t_k} B_y(t) < (B_y + \Delta); \end{cases}$$

$$\left| \frac{dMi(t)}{dt} \right| \leq W^{(M)} \max_i; \quad \left| \frac{dCi(t)}{dt} \right| \leq W^{(C)} \max_i; \quad \left| \frac{dV(t)}{dt} \right| \leq W^{(V)} \max; \quad \left| \frac{dpH(t)}{dt} \right| \leq W^{(pH)} \max,$$

де M_i – маса i -ї токсичної речовини; C_i – концентрація i -ї мінеральної речовини; V – загальний об'єм рідини в організмі; pH – значення кислотно-лужної рівноваги рідини організму; B_y – концентрація вуглеводів; $W^{(i)} \max$ – гранична швидкість зміни параметрів, які керуються.

Для виконання цільової функції ЕНБС необхідно здійснити моніторинг поточного фізіологічного стану пацієнта, параметрів АШН, ТЗКВ, розрахувати поточні значення цільової функції PFH , змінити параметри АШК і ТЗКВ при невиконанні цільової функції або деструктивному стані пацієнта. Структурна схема та канали інформаційних зв'язків на цьому етапі показано на рис. 2, б.

Моніторинг поточного фізіологічного стану пацієнта та параметрів АШН, ТЗКВ полягає у виконанні алгоритму формування інформаційного масиву:

– відхилення поточних біохімічних показників організму пацієнта:

$$\Pi_1(t) \in \left\{ f_i(BH_i(t), BH_i^{opt}) \right\}_{i=15} \Big|_{\Leftarrow E_D, L_D, B_D}^{\Rightarrow \Pi_1}; \quad (10)$$

– відхилення поточних фізіологічних показників пацієнта:

$$\Pi_2(t) \in \left\{ f_j(FS_j(t), FS_j^{opt}) \right\}_{j=7} \Big|_{\Leftarrow T_D, B_D}^{\Rightarrow \Pi_2}; \quad (11)$$

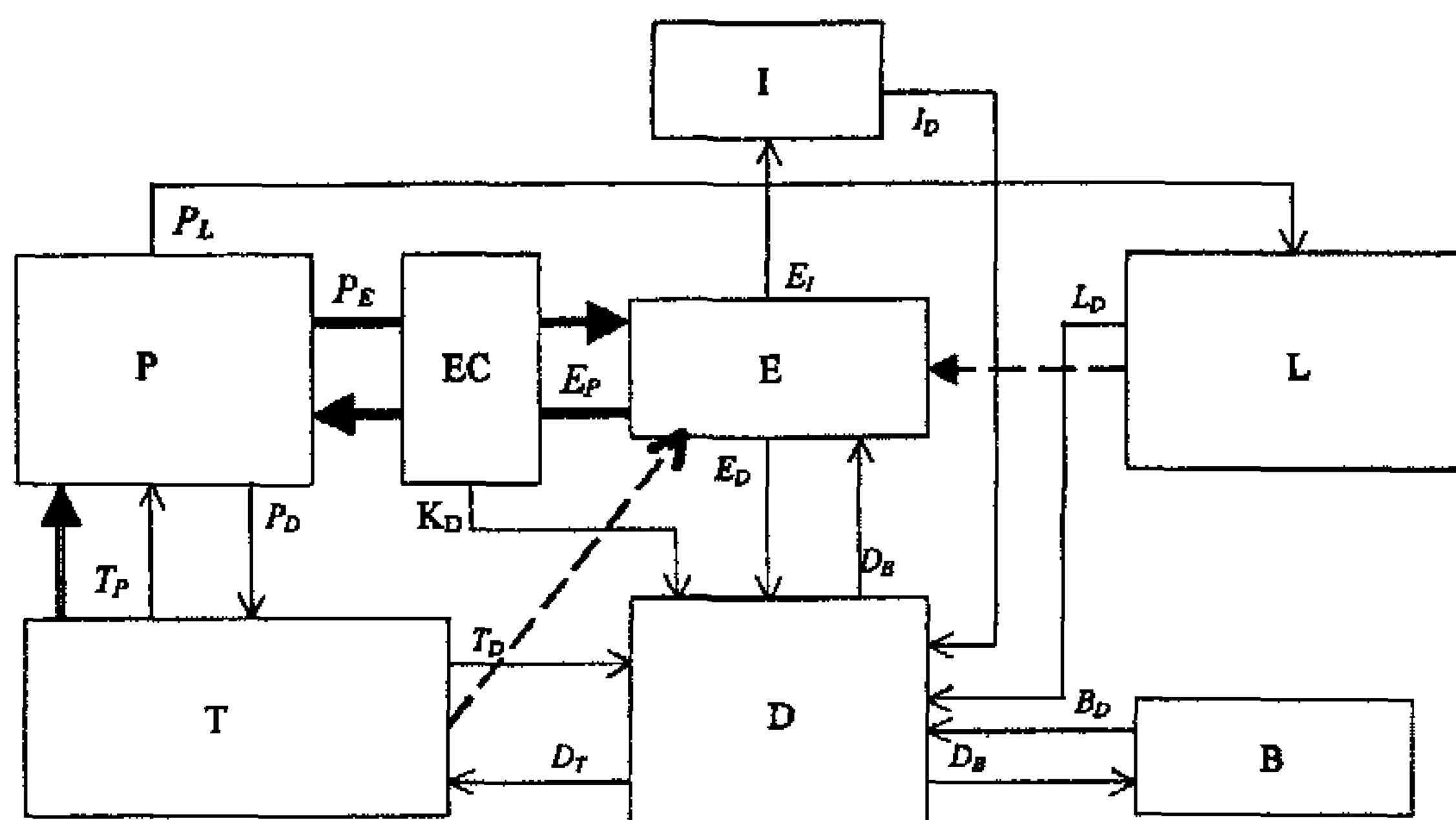
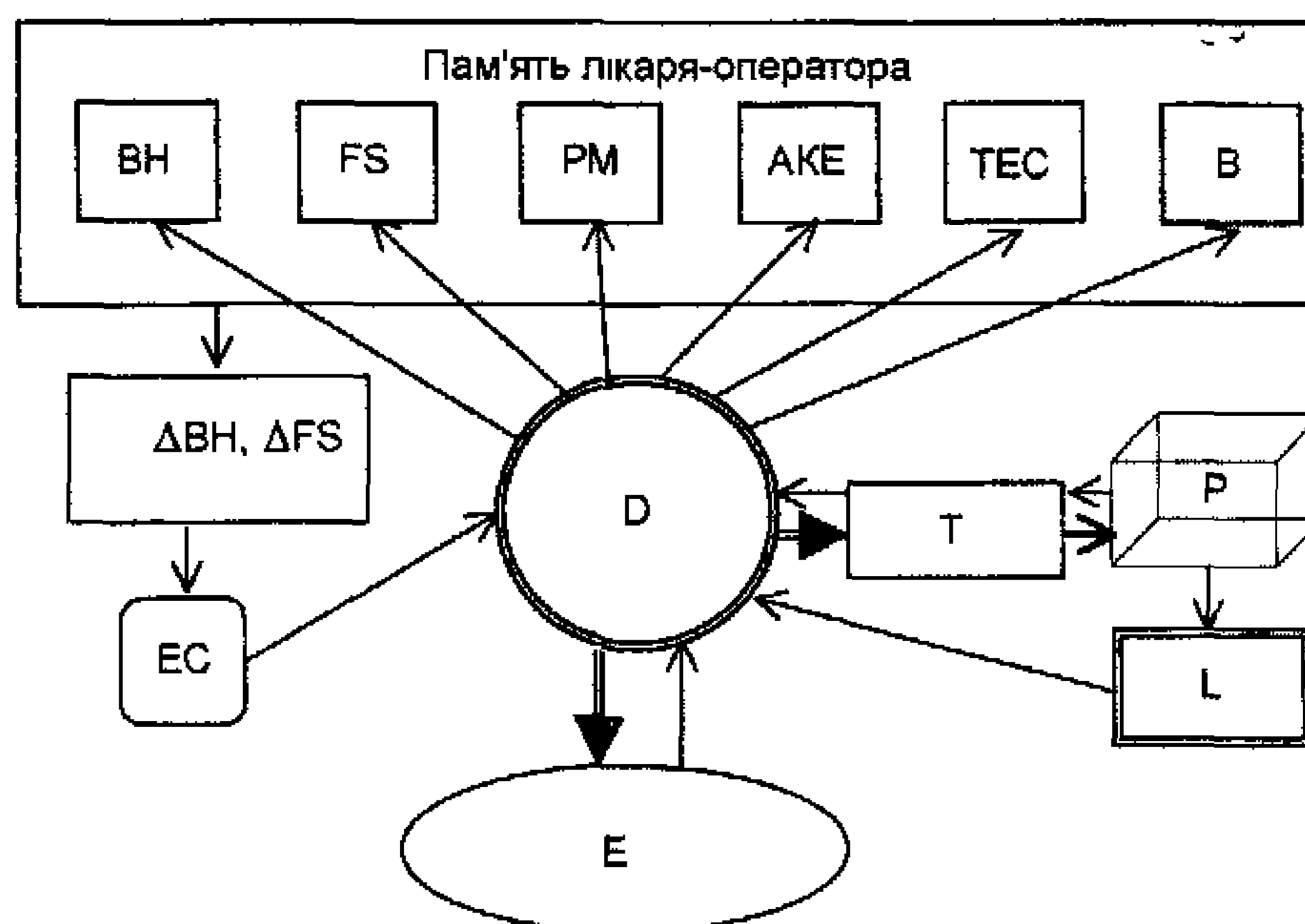
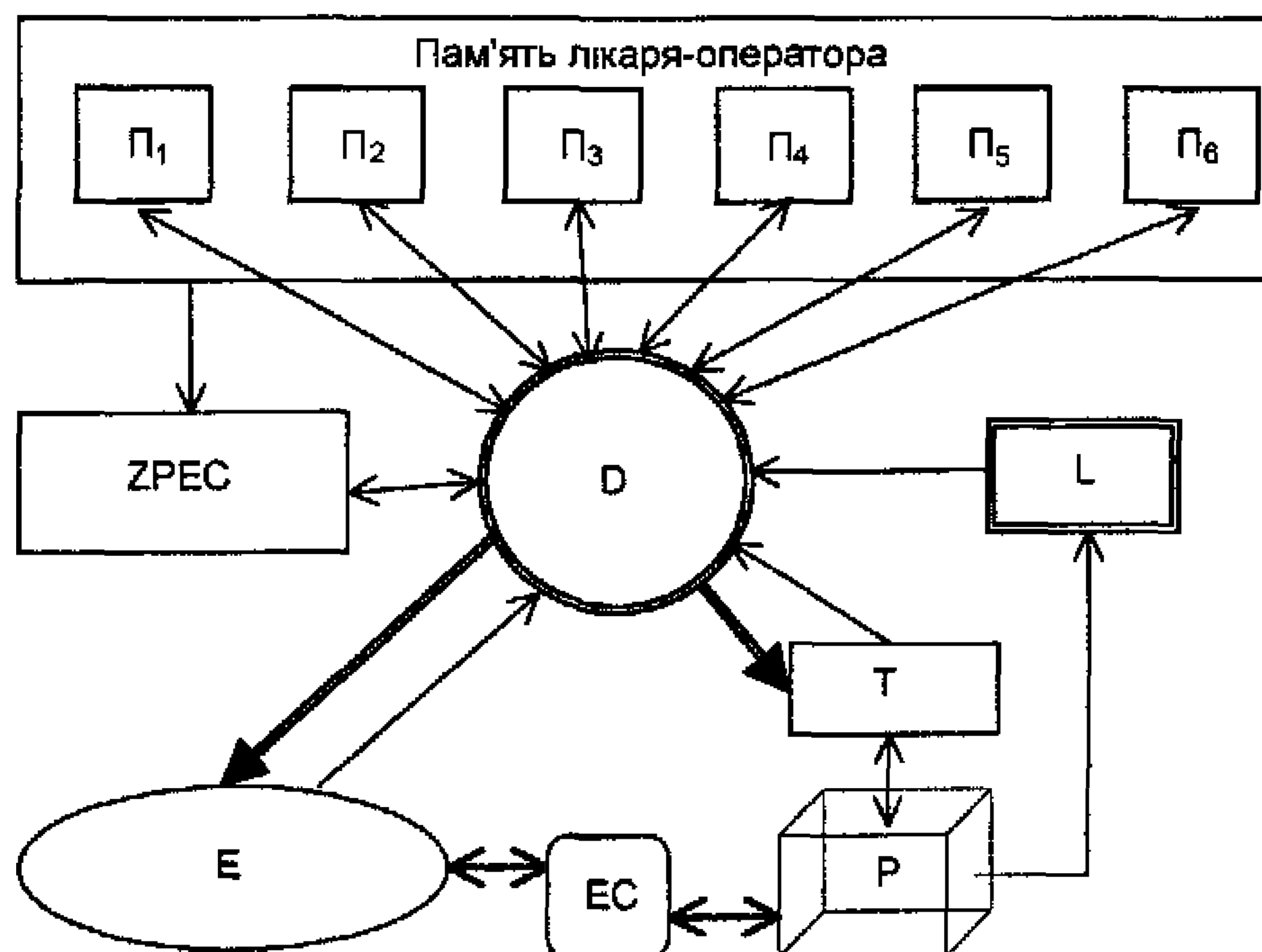


Рис. 1. Структурно-інформаційна схема сучасної гемодіалітичної системи:
 I – інженер; P – пацієнт; EC – екстракорпоральний контур; E – гемодіалітичний апарат;
 L – лабораторно-діагностичний комплекс; T – технічні засоби контролю фізіологічного стану пацієнта;
 D – лікар; B – база даних;
 ⇒ – речовинні зв'язки, → – інформаційні зв'язки; ---> – відсутні інформаційні зв'язки



а



б

Рис. 2. Інформаційні потоки в БТС ЕНБС на підготовчому етапі (а), у період виконання (б):
 D – лікар, L – лабораторно-діагностичний комплекс; E – гемодіалітичний апарат; EC – екстракорпоральний контур; T – технічні засоби контролю фізіологічного стану пацієнта; P – пацієнт;
 ⇒ – ефекторні реакції; → – інформаційні зв'язки; ⇒ – речовинні зв'язки

– поточного стану параметрів екстракорпорального контуру:

$$\Pi_3(t) \in \{V_B, V_D, T_D, P_B, P_A, P_D, V_{UF}, W_{UF}, C_D\}_{\leftarrow E_D}^{\Rightarrow \Pi_3}; \quad (12)$$

– поточного стану аварійних систем АШН:

$$\Pi_4(t) \in \{K_D, A_S, Z_M, O_P, C_L\}_{\leftarrow E_D}^{\Rightarrow \Pi_3}; \quad (13)$$

– поточного стану ТЗКВ:

$$\Pi_5(t) \in \{P_V, F_H, F_R, T_B, M_B, S_N\}_{\leftarrow T_D}^{\Rightarrow \Pi_4}; \quad (14)$$

– поточних значень відхилення цільової функції:

$$\Pi_6(t) \in \{f_i(PFH_i(t), PFH_i)\}_{i=0}^{\Rightarrow \Pi_5} \left|_{\leftarrow L_D, E_D}\right. \quad (15)$$

Після аналізу масивів (10)–(15) потрібно сформулювати масив зміни фізичних параметрів ZPEC, при необхідності інформаційний масив зміни фізіологічного стану пацієнта P для компенсації відхилень параметрів технологічного процесу:

$$ZPEC(t) \in \{f_{ij}[\Delta BH_i(t), \Delta FS_j(t)]\}_{i=0}^{\Rightarrow D_E} \left|_{\leftarrow B_D, I_D, P_D, K_D, E_D, I_D}\right.$$

Враховуючи те, що час проведення гемодіалізу в середньому становить 4 год, а можливий час виходу об'єкта керування за допустимі технологічні допуски 10–15 хв (тобто стан пацієнта може значно погіршитися, а в деяких випадках ставати критичним), необхідно з дискретністю, значно меншою ніж 10 хв, постійно розраховувати масиви інформації (10)–(15) і корегувати режими масообміну в екстракорпоральному контурі.

Отже, наведені інформаційні моделі компонентів системи і їх взаємозв'язки показують, що сучасна гемодіалізна система має такі недоліки:

- головним структурним елементом, який сприймає і обробляє інформацію, формує керуючі впливи на регулюючі органи, є лікар (оператор);
- обсяг інформації, який надходить до оператора, є великим, і час її обробки може перевищувати час виходу технологічних параметрів за допустимі межі;
- інформаційні параметри про поточний стан об'єкта керування не визначені;
- прямий канал інформаційного зв'язку між об'єктом керування, лабораторно-діагностичним комплексом і комп'ютерною системою обробки інформації АШН відсутній.

Без усунення перерахованих недоліків побудови сучасних гемодіалізних систем неможливе створення АСКТП нормалізації біохімічного складу рідинного об'єму організму людини і підвищення якості лікування пацієнтів з термінальною стадією ниркової недостатності.

Список літератури

1. *Биотехнические системы: Теория и проектирование* / В.М. Ахутина, А.П. Немирко, Н.Н. Першин и др. – Л.: Электротехн. ин-т, 1981. – 220 с.
2. *Бир С.* Кибернетика и управление производством. – М.: Наука, 1963. – 275 с.
3. *Положення про міське відділення хронічного гемодіалізу.* Міське управління охорони здоров'я. – К.: МОЗ, 1989 – 10 с.
4. *Баран Е.Я., Цыбуляк Е.И., Тхор В.А., Поляков А.А.* Лечение больных с терминальной почечной недостаточностью: Метод. рекомендации. – К.: НИИ Урологии, 1987. – 25 с.
5. *4008S Hemodialysis machine operations instructions.* Software 2.9. 6765071, Fresenius medical care.
6. *Вальков В.А., Вершин В.Е.* Автоматизированные системы управления технологическими процессами. – Л.: Политехника, 1991. – 269 с.
7. *Стецюк Е. А., Лебедев С. В.* Классический гемодиализ. – М.: Алтин, 1997. – 182 с.
8. *Бойко І.Ф., Поліщук С.Т.* Біотехнічні системи та екстракорпоральна корекція гомеостазу// Вісн. НАУ.– 2001. – №4. – С. 132-137.

Стаття надійшла до редакції 30.01.02.