

УДК 62.50

В.І. Чепіженко, к.т.н., с.н.с.

## ЕНЕРГЕТИЧНА КОНЦЕПЦІЯ ЯДРА ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ CALS-ПРОЦЕСІВ У СКЛАДНИХ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ

*Запропоновано концептуальні підходи до створення інтегрованих інформаційно-енергетичних моделей супроводження життєвого циклу складних технічних систем.*

*Conceptual approaches to creation of the integrated information-power models of support of life cycle of difficult technical systems are offered.*

енергія, життєвий цикл, інтегрована модель, інформація, складна технічна система, технічний стан

### Постановка проблеми

Нині у світовій практиці під час проектування, виробництва й експлуатації складних технічних систем (СТС) широко застосовуються CALS-процеси (Continuous Acquisition and Life Cycle Support, Computer Aided Acquisition and Logistic Support, Computer Aided Logistic Support), що є технологіями безперервної інформаційної підтримки життєвого циклу СТС.

Складні технічні системи характеризуються тим, що в них всі функціональні процеси мають динамічний характер. Ці процеси можуть бути описані лише за допомогою спеціальних моделей з тим або іншим ступенем адекватності.

Характерними властивостями СТС є ієрархічність і складні структурні та функціональні взаємини між елементами системи [1].

Ядром CALS-процесів є [2]:

- інтегровані інформаційні моделі самих СТС, що відбивають цільове призначення систем;
- інформаційні моделі еволюції технічного стану СТС на всьому інтервалі їхнього життєвого циклу;
- моделі виробничого й експлуатаційного середовища.

Такі моделі є неузгодженими і у рамках єдиного CALS-процесу вимагають функціональної та структурної інтеграції.

Дослідження CALS-процесів у СТС пов'язано із двома видами складності – внутрішньою та зовнішньою.

Внутрішня складність обумовлена необхідністю врахування синергетичних властивостей, притаманних як елементам СТС, так і всій системі в цілому.

Зовнішня складність полягає в необхідності врахувати вплив всіх факторів зовнішнього середовища на систему, які можуть викликати відхилення від заданої мети її існування або розвитку.

### Аналіз досліджень

Фундаментальною основою досліджень CALS-процесів функціонування й еволюції стану СТС сьогодні є теоретико-ймовірнісні методи. У теоретико-ймовірнісній схемі прогнозується не поведіння СТС, а частота того або іншого її поведіння, пов'язана з імовірністю. Причому передбачається, що частота не змінюється при заданих умовах (так звана стохастична стійкість) [3]. Але в складних ситуаціях самі умови міняються досить швидко й не підлягають оцінці, тому статистичний параметр – частота подій, часто втрачає свій фізичний зміст. Незважаючи на це, основні процеси функціонування СТС моделюються в термінах випадковості, що відбиває неповноту знань, їхню невірогідність, а також нечіткість й неточність стосовно їхнього змісту. Нечіткість і неточність асоціюються з розподілом ймовірностей, неясність і невизначеність відбиваються у частковому незнанні останнього. Тому проблеми, що виникають у зв'язку із цим, формулюються в термінах теорії перевірки статистичних гіпотез і теорії оцінювання.

Проведений аналіз застосування теоретико-ймовірнісних методів показує, що вони недостатньо ефективні під час моделювання широкого класу CALS-процесів і явищ у СТС у тих випадках, коли:

- дослідник має обмежену кількість однотипних СТС або досліджувана СТС взагалі є унікальною;
- обсяг статистичних даних про процеси, що протікають в однотипних СТС, малий або статистичні дані повністю відсутні;
- статистичні дані про характеристики СТС мають низьку вірогідність;
- проведення періодичних перевірок статистичних гіпотез про характеристики СТС неможливо або пов'язано з істотними труднощами та ін.

Отже, використання теоретико-ймовірнісних методів не дозволяє досить ефективно синтезувати моделі CALS-процесів, які не тільки адекватно відбивали б динаміку цих процесів, але й давали б можливість керувати цими процесами.

Ще одним істотним недоліком існуючих моделей CALS-процесів є їхня інформаційна спрямованість, тобто дані моделі враховують лише інформаційні взаємодії між елементами та частинами СТС, що не потребують значних витрат енергії та речовини. Фактично ігнорується матеріально-енергетична сутність CALS-процесів, що протікають у СТС. Таке абстрагування від фізичної сутності CALS-процесів не дозволяє виявити дійсні механізми інтеграції керованої взаємодії, енергії, речовини й інформації у СТС.

А.А. Колісників у своїй роботі [4] дає характеристику шляхів дослідження СТС: «... важливо розглядати їхнє (СТС) поведіння як з погляду динаміки, коли домінуючу роль відіграє енергія, так і з погляду інформаційних процесів, що протікають у них, коли головне – в «змістовному» наповненні сигналів керування».

Основою для усунення недоліків моделювання CALS-процесів є розробка єдиної інтегрованої моделі самої СТС та її життєвого циклу, яка дозволяє повномасштабний опис енергетичних процесів, що протікають, і яка виступає в ролі єдиного джерела інформації для керування цими процесами. Однак складність створення такої моделі нерозривно пов'язана зі складністю структури самих СТС і процесів, що протікають у них.

Таким чином, виникає протиріччя між потребою в розробці інтегрованих моделей "СТС – CALS-процеси", які дозволяють проводити аналіз динамічних еволюційних CALS-процесів, що протікають на інтервалі всього життєвого циклу СТС, і недостатніми можливостями існуючого науково-методичного апарата для синтезу таких моделей з метою керування цими процесами.

Вирішення цієї проблеми пропонується шукати в створенні й використанні закономірних загальносистемних еволюційних моделей, які повинні враховувати динамічні, параметричні, економічні, енергетичні й експлуатаційні CALS-процеси, що протікають у кожній конкретній СТС.

**Метою** статті є обґрунтування енергетичної концепції ядра для моделювання CALS-процесів у складних технічних системах на всьому інтервалі

їхнього життєвого циклу, яка адекватно відбиває енергетичний вплив на процеси деградації, еволюції і старіння, що протікають у СТС, і яка є основою для синтезу керування цими процесами.

### Основні положення концепції

Як універсальну фізичну величину утворення системних (цілісних) властивостей СТС із множини окремих елементів пропонуємо використовувати узагальнену фізичну величину – енергію.

При розгляді енергетичних CALS-процесів, що протікають у СТС, будемо враховувати, що більшість СТС можна віднести до класу закритих систем. Через границю цих систем не відбувається обміну речовиною із зовнішнім середовищем, а відбувається лише обмін енергією. Наприклад, електричні системи на всьому інтервалі життєвого циклу майже не змінюють своєї маси, тому що перенос речовини в струмопроводах за допомогою потоку заряджених частинок не великий. Незначна зміна маси на практиці спостерігається й у механічних системах, що містять у своїй конструкції вузли тертя, тому що існуючі мастила та методи їхнього використання істотно знижують зношування тертьових поверхонь.

Зміна технічного стану СТС на інтервалі їхнього життєвого циклу носить динамічний характер. Під динамічною системою розуміємо таку СТС, для якої однозначно визначене поняття стану як сукупності енергетичних потоків, що протікають через неї у заданий момент часу, а також для якої заданий оператор, що визначає еволюцію початкового технічного стану системи в часі.

За відсутності відновлення, процеси еволюції технічного стану СТС носять необоротний характер. Під еволюцією технічного стану СТС розуміють процес поступового та безперервного переходу технічного стану системи від одного стану до іншого, котрий проявляється в зміні її параметрів і порушенні процесів функціонування. Характерними ознаками еволюційних змін технічного стану СТС є фізичне зношування та старіння елементів її конструкції.

Основною умовою для ефективного функціонування CALS-процесів під час створення, зберігання й експлуатації СТС є їхня енергетична доцільність, виправданість. Тобто певній кількості інформації, реалізованої в структурі СТС, відповідає строго певна кількість енергії, зв'язаної в цій структурі. Ступінь структурної складності СТС відповідає її енергетичним властивостям. Отже, кількість інформації, що міститься в структурі, обумовлена кількістю зв'язаної в ній енергії.

Для обґрунтування подальших міркувань виділимо три основні компоненти загальної енергії СТС:

- внутрішня енергія – це енергія, що характеризує структурний та функціональний стани конструкції системи і спрямована на збереження основних системних властивостей СТС;
- енергія, що проходить через СТС і забезпечує цільове її функціонування;
- енергія, що розсіюється в конструкції СТС і призводить до її деградації, а також до віртуальних переміщень параметрів стану та структури системи.

Цілісність системи – це принципова неможливість звести її властивості до суми властивостей складових елементів і невиводимість із останніх властивостей цілого.

Під віртуальними переміщеннями параметрів СТС розуміємо зміну положення (переміщення) у просторі станів параметрів функціональної моделі системи, що не призводить до порушення функціональної та структурної цілісності СТС. Наприклад, фізичну інтерпретацію поняття "віртуальні (можливі) переміщення" для механічної системи [5] можна трактувати як нескінченно малі переміщення, які можуть робити точки механічної системи із займаного ними в цей момент часу положення, не порушуючи накладених на систему зв'язків.

Всю сукупність енергетичних процесів, що протікають у СТС і на її границі із середовищем, і що призводять до зміни технічного стану  $S$  (рис. 1), можна розділити на зовнішні й внутрішні.

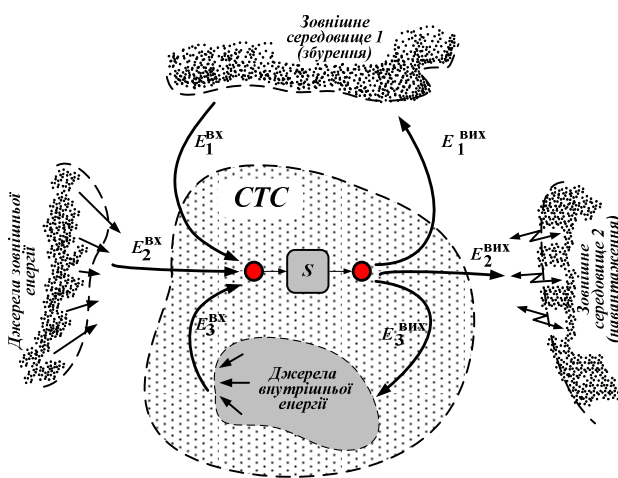


Рис. 1. Енергетичні потоки в СТС

На вхід СТС надходять енергетичні потоки:

$E_1^{\text{BX}}$  – енергія зовнішнього середовища, пов'язана із зовнішніми збуреннями основного процесу функціонування СТС (гравітація Землі, температура й атмосферний тиск, вітер та ін.);

$E_2^{\text{BX}}$  – енергія, що надходить із зовнішніх джерел, яка включає енергію керування та енергію «робочого тіла», що підводиться з метою забезпечення процесу цільового функціонування СТС і використовується на виробництво корисної роботи (енергія палива, що підводиться до СТС, електрична енергія, робочий тиск рідин і газів та ін.).

У процесі функціонування на виході СТС спостерігаються потоки енергії:

$E_1^{\text{ВНХ}}$  – дисипація енергії системи в зовнішнє середовище;

$E_2^{\text{ВНХ}}$  – енергія, спрямована на забезпечення виконання основних функціональних цільових поведінок СТС (виробництво корисної роботи).

Дисипація енергії – це перехід частини енергії впорядкованого процесу у фізичній системі в інші види енергії (теплову, звукову, світлову, хвильову, електромагнітну та ін.), що не беруть участь у процесі виробництва корисної роботи системою. Наприклад, дисипація енергії механічних систем означає перехід частини їхньої механічної енергії в інші форми за рахунок наявності сил опору.

Внутрішня енергія системи – це енергія руху й взаємодії частин, з яких складається тіло. Внутрішня енергія тіла не залежить від положення тіла щодо інших тіл і від швидкості руху тіла. Відповідно до понять класичної фізики [6], внутрішня енергія тіла складається:

- з енергії хаотичного руху молекул;
- з потенційної енергії атомів, що утворюють молекулу або кристалічну структуру;
- із внутрішньоатомної енергії.

Однак аналіз теоретичних досліджень фізики і особливо термодинаміки [7] показує, що збереження енергії в складних технічних системах можна формулювати та використовувати тільки мовою макрозмінних.

Внутрішня енергія системи може проявлятися у формі теплоти, що розсіюється в зовнішнє середовище, або у формі роботи системи в середовищі.

Джерелами внутрішньої енергії є конструктивні елементи СТС. Зв'язана в структурі СТС внутрішня енергія впливає на технічний стан  $S$  і використовується на створення, відновлення та підтримку на заданому архітектурному рівні цієї структури.

Часто в літературі як поняття внутрішньої енергії використовують поняття поверхневої енергії, що закладається під час виготовлення деталей (вузлів) і виступає в ролі початкових умов динамічного процесу її поверхневих руйнувань (деградацій) [8]. Поверхнева енергія пропорційна твердості поверхні. Витрата поверхневої енергії пропорційна ступеню зношування взаємодіючих поверхонь і характеризується дисипацією звукової, теплової, електричної та механічної енергій. Динамічне навантаження поверхонь тертя пропорційно росту деградаційних процесів у матеріалі.

Необхідний запас внутрішньої енергії СТС розраховується та закладається на етапах її проектування [9]. Енергетичні розрахунки виконують з метою визначення таких енергетичних взаємодій між елементами конструкції СТС, які б забезпечили:

- цілісність системи на всьому інтервалі життєвого циклу за максимально можливих експлуатаційних навантаженнях;
- виконання цільового функціонального призначення системи.

Потоки зовнішньої енергії, що проходять через СТС, змінюють характеристики джерел внутрішньої енергії шляхом передачі частини енергії  $E_3^{внх}$ .

У загальному випадку зміна повної внутрішньої енергії має вигляд:

$$dE^{внт} = dQ + dA_{мех} + dE_q + dE_{ел} + dE_{маг} + dE_{пов} + \dots \quad (1)$$

де:

$dQ$  – зміна теплоти в системі;

$dA_{мех}$  – механічна робота, пов'язана зі зміною об'єма системи:

$$dA_{мех} = -pdV ;$$

$dE_q$  – енергія переносу заряду  $dq$  крізь різницю потенціалів  $\phi$ :

$$dE_q = \phi dq ;$$

$dE_{ел}$  – зміна діелектричної енергії, пов'язана зі зміною електричного дипольного моменту  $dP$  в електричному полі  $A$ :

$$dE_{ел} = -AdV ;$$

$dE_{маг}$  – зміна магнітної енергії, пов'язана зі зміною магнітного дипольного моменту  $dM$  у магнітному полі  $B$ :

$$dE_{маг} = -BdM ;$$

$dE_{пов}$  – зміна енергії, пов'язана зі зміною площі  $dH$ :

$$dE_{пов} = \sigma dH.$$

Аналіз виразу (1) показує, що визначення внутрішньої енергії СТС може ускладнюватись необхідністю враховувати енергетичні процеси різної природи.

На практиці потужність джерел внутрішньої енергії СТС завжди обмежена та пропорційна на мінімальній потужності, яка необхідна для забезпечення функціональних поведінок системи.

Наслідком обмеженості потужності джерел внутрішньої енергії є залежність значень вихідних координат СТС від характеру навантаження. У свою чергу, характер і динамічні режими роботи СТС визначаються зовнішнім навантаженням на її виході. З одного боку, при сумірності вхідної потужності зі станом СТС (внутрішньою енергією) спостерігається вплив режимів роботи (динаміки) СТС на характер змін і значення її вихідних (енергетичних) координат. З іншого боку, наслідком відхилення вихідних координат від їхніх номінальних значень є зміна якості функціонування СТС.

Складну технічну систему можна розглядати як акумулятор енергії, що накопичується в структурі системи, а потім витрачається на утворення її системних властивостей. Отже, поняття "цілісність системи" можна трактувати як її здатність акумулювати енергію. Під час розпаду системи на вихідні елементи в середовище виділяється енергія, що була зосереджена у зв'язках вихідних елементів.

Отже, в енергетичному визначенні СТС – це цілісна сукупність елементів, що володіє здатністю акумулювати енергію, поглинаючи її із середовища, за рахунок певної взаємодії елементів, а також віддавати енергію у вигляді корисної роботи та дисипації в елементах конструкції й у зовнішнє середовище.

Для будь-якого процесу, що протікає між початковим і кінцевим станами системи, можна обчислити зміну ентропії [7] – необоротність процесів у системі.

Ентропія є мірою ступеня дисипації енергії, у результаті чого вона частково втрачає здатність перетворюватися в роботу. Якщо енергія є мірою здатності СТС до здійснення роботи, то ентропія є мірою того, наскільки ця здатність "знецінилася" або взагалі виявилася загубленою [10].

Будь-яка СТС, через конструкцію якої проходить потік енергії (потужності), за тривалої експлуатації прагне під час свого вільного руху або до рівноваги, або, у більш загальному випадку, до руху консервативної системи з меншим числом ступенів волі [11].

Втрата ступенів волі системи характеризує перехід конструктивної деградації системи в її деградацію функціональну. Отже, кількість енергії, що пройшла через систему, визначає її технічний стан.

Властивості будь-якої фізичної системи можуть виражатися за допомогою системи рівнянь, що встановлюють співвідношення потоків енергії або потужності між системою та навколишнім середовищем. Найбільш повно такі залежності можна описати Гамільтоновою системою диференціальних рівнянь:

$$\begin{aligned} \frac{dq_i}{dt} &= \frac{\partial H_i}{\partial p_i}, \\ \frac{dp_i}{dt} &= -\frac{\partial H_i}{\partial q_i} + Q_i, \end{aligned} \quad (2)$$

де

$q_i$  – узагальнені координати  $i$ -го елемента системи;

$p_i$  – узагальнені імпульси  $i$ -го елемента системи;

$H_i$  – гамільтонова функція, відповідна сумі кінетичної та потенціальної енергій  $i$ -го елемента системи;

$Q_i$  – узагальнені сили.

Рівняння (2) легко приводяться до канонічної форми Коші. Для цього, опускаючи нижній індекс, перетворимо друге рівняння системи (2):

$$\frac{dp}{dt} + \frac{\partial H}{\partial q} = Q. \quad (3)$$

Розпишемо перший член у лівій частині рівняння (3):

$$\frac{dp}{dt} = \frac{d}{dt}(mv) = m \frac{d}{dt} \left( \frac{dq}{dt} \right) = m \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial H}{\partial p} \right) = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial H}{\partial \dot{q}} \right), \quad (4)$$

де

$m$  – маса;

$v$  – швидкість.

Узагальнені сили  $Q$  в загальному випадку можна представити у вигляді:

$$Q(q_1, \dots, q_n; \dot{q}_1, \dots, \dot{q}_n) = -\frac{\partial F}{\partial \dot{q}} - G - \sum f, \quad (5)$$

де

$F$  – дисипативна функція Релея;

$G$  – гіроскопічні сили;

$\sum f$  – інші сили, що діють на систему.

Функції Гамільтона та Релея можуть виражатися через квадратичні функції [12]:

$$\begin{aligned} H &= T + U = \frac{1}{2} M_{ij}(q_1, \dots, q_n) \dot{q}_i \dot{q}_j + \frac{1}{2} R_{ij}(q_1, \dots, q_n) q_i q_j; \\ F &= \frac{1}{2} K_{ij}(q_1, \dots, q_n) \dot{q}_i \dot{q}_j, \end{aligned} \quad (6)$$

де

$M_{ij}$  – функції, що характеризують масу окремих елементів системи,

$R_{ij}$  – функції, що враховують жорсткість (упругість) зв'язків у системі;

$K_{ij}$  – функції, що характеризують тертя або дисипацію енергії під час взаємодії елементів системи.

Підставимо функцію (6) в рівняння (2):

$$A\ddot{q} + B\dot{q} + Cq = f. \quad (7)$$

Узагальнена динамічна модель енергетичного стану елементів СТС (7) може перетворитися до вигляду системи впорядкованих рівнянь виду:

$$\sum_{k=1}^n e_{ik} q_k = f_i \quad (k=1, 2, \dots, n), \quad (8)$$

де

$e_{ik}$  – квадратичний диференціальний оператор виду:

$$e_{ik} = A_{ik} \frac{d^2}{dt^2} + B_{ik} \frac{d}{dt} + C_{ik}. \quad (9)$$

Рівняння (8) є системою звичайних диференціальних рівнянь другого порядку. У загальному випадку, вираження коефіцієнтів  $A$ ,  $B$  і  $C$  є залежностями від кінетичної, дисипативної та потенційної енергій відповідно. Одночасно ці коефіцієнти є функціями від параметрів елементів СТС. Таким чином рівняння Гамільтона (2) дозволяють зв'язати воедино енергетичні та параметричні (інформаційні) характеристики еволюційних процесів, що протікають у СТС (рис. 2).

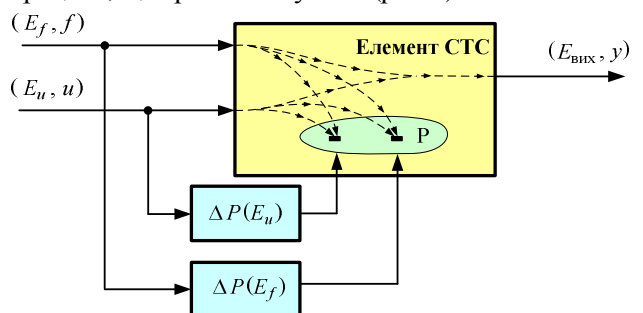


Рис. 2. Схема енергетичних і інформаційних потоків у елементах СТС

Енергетичні потоки керування  $E_u$  та зовнішнього середовища  $E_f$ , що надходять на вхід елементів СТС, з одного боку спрямовані на одержання корисної

роботи або енергії  $E_{вух}$ , а з іншого боку змінюють внутрішню енергію СТС, що викликає еволюційні процеси зміни її технічного стану  $\Delta P(E_u)$  та  $\Delta P(E_f)$  (рис. 3).

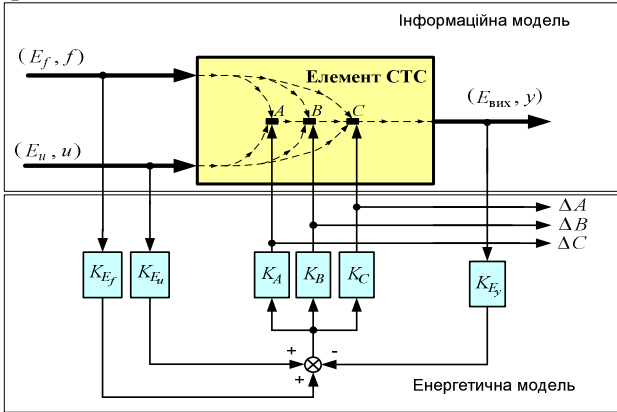


Рис. 3. Схема процесу використання (перетворення) енергії в елементах СТС

Інтегрована модель включає:

- моделі елементів СТС, що у загальному випадку являють собою впорядковану ієрархічну структуру;
- модель потоку енергії через елементи СТС;
- моделі віртуальних переміщень параметрів елементів СТС, обумовлені енергетичними потоками, що протікають через неї.

Модель передбачає можливість врахування відновлення технічного стану СТС через вхід  $E_0$ .

Отже, загальна динамічна модель елементів СТС може бути розділена на дві частини – енергетичну й інформаційну.

Оскільки зв'язки та структури в реальних системах погано спостерігаються, доцільно використовувати відновлення структури потоку енергії за допомогою відповідної моделі (рис. 4).

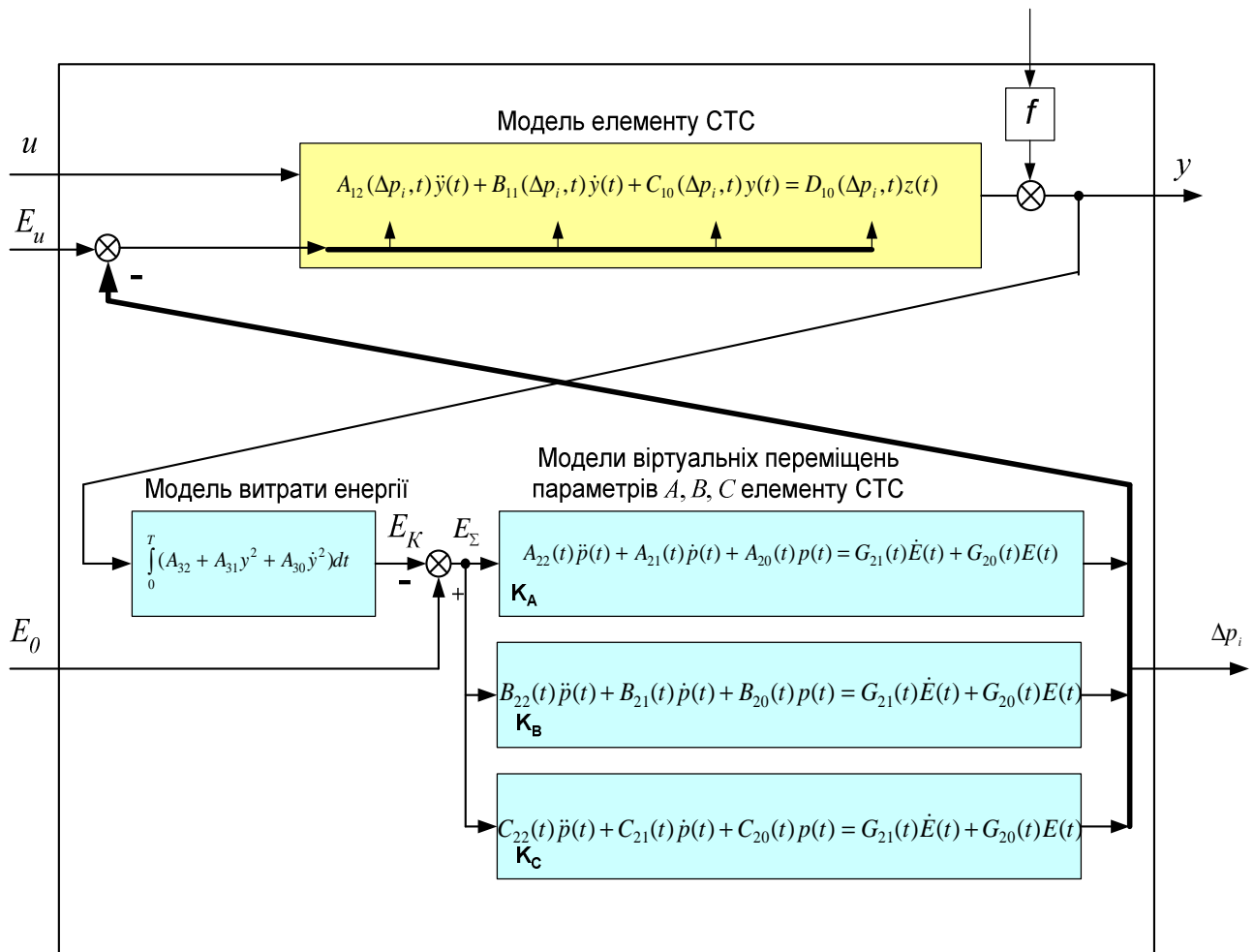


Рис. 4. Інтегрована модель еволюції технічного стану елемента СТС у вигляді «чотириполосника»

## Висновки

1. На основі запропонованого енергоінформаційного підходу до аналізу процесів у цілісних СТС отримано модель процесів у СТС у вигляді багатополосників.
2. Отримана модель дозволяє обґрунтовано визначати вимоги до масиву та структури бази даних інформаційного забезпечення CALS-систем.
3. Запропоновано модель дозволяє інтегровано враховувати зміни стану СТС, викликані як напрацюванням, так і терміном служби експлуатації (зберігання) при  $(E_u, u) = 0$ .

## Література

1. Цвиркун А.Д. Основы синтеза структуры сложных систем / А.Д. Цвиркун. – М.: Наука, 1982. – 200 с.
2. Информационно-вычислительные системы в машиностроении CALS-технологии / Ю.М. Соломенцев, В.Г. Митрофанов, В.В. Павлов, А.В. Рыбаков. – М.: Наука, 2003. – 292 с.
3. Чуличков А. И. Математические модели нелинейной динамики / А.И. Чуличков. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 296 с.
4. Колесников А.А. Когнитивные возможности синергетики // Вестник Российской академии наук. – 2003. – Т. 73, № 8. – С. 727–734.
5. Чуличков А.И. Математические модели нелинейной динамики / А.И. Чуличков. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 296 с.
6. Ландау Л.Д. Теоретическая физика: учеб. пособие / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – В 10-ти т. Т. I. Механика. – М.: Наука, 1988. – 216 с.
7. Пригожин И. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур / И. Пригожин, Д. Кондепуди. – М.: Мир, 2002. – 462 с.
8. Крагельский И.В. Развитие науки о трении / И.В. Крагельский, В.С.Щедров. – М.: Изд-во Академии наук СССР, 1956. – 237 с.
9. Артюшин Л.М. Теория автоматического управления / Л.М. Артюшин, О.А. Машков, Н.С. Сивов. – К.: КИВВС, – 1995. – 628 с.
10. Фен Дж. Машины, энергия, энтропия / Дж. Фен. – М.: Мир, 1986. – 336 с.
11. Биркгоф Дж. Д. Динамические системы / Дж. Д. Бикгоф. – Ижевск: Изд. дом "Удмурдский университет". – 1999. – 408 с.
12. Неймарк Ю.И. Динамика неавтономных систем / Ю.И. Неймарк, Н.А. Фуфаев. – М.: Наука, 1967. – 520с.

Стаття надійшла до редакції 07.09.09.