

DOI 10.33099/2618-1614-2018-4-3-16-23

УДК 623.4.011

**П. П. Чабаненко,**

доктор військових наук, професор,  
провідний науковий співробітник  
Центрального науково-дослідного інституту  
озброєння та військової техніки Збройних Сил України,  
заслужений діяч науки і техніки України,

**С. М. Розгонаєв,**

кандидат технічних наук,  
старший науковий співробітник,  
докторант Центрального науково-дослідного  
інституту озброєння та військової техніки  
Збройних Сил України, капітан 1 рангу

## Оцінювання ефективності бойової системи за принципами відповідності та зворотного зв'язку

Запропоновано кількісну оцінку ефективності бойової системи з використанням графоаналітичних моделей згідно з принципами відповідності меті та перервного зворотного зв'язку. Уточненні поняття «організація» бойової системи та «помилка» її технічних та ергатичних елементів. Прикладами з практики та розрахунками на моделях показана подвійність впливу зворотного зв'язку (користь/школа) на ефективність бойової системи.

*Ключові слова:* бойова система, ефективність функціонування, показники ефективності, помилка, об'єкт управління, зворотний зв'язок, принцип відповідності.

© П. П. Чабаненко, С. М. Розгонаєв, 2018

**П**остановка проблеми. Як важливі формувannya збройної сили виокремлюють бойові системи (БС). До них належать організаційно-технічні системи військового призначення для стримування та протидії агресії [1, с. 57]. БС охоплюють ергатичні й технічні елементи: бойові обслуги, екіпажі, підрозділи, органи військового управління (ОВУ) і додані їм для досягнення мети озброєння і військової техніки (ОВТ), матеріальні та інформаційні ресурси. Важливе значення в таких системах має **організація** – кістяк системи, що охоплює склад її елементів, розташування їх за рівнями, розподіл і перерозподіл функцій між ними, їхні функціональні зв'язки і відносини, які мають системоутворюючий характер і передбачають удосконалення в досягненні мети протидії з противником. Організація БС визначається законами та бойовими статутами, іншими документами, правилами й розпорядженнями.

До основних особливостей БС належать:

- складність і динамічність функціонування;
- зміна вектора цілей і вирішуваних завдань;
- невизначеність початкових і поточних даних про стан багатьох об'єктів управління, задум і дії противника;
- здатність до цілеспрямованої зміни структури функцій, навчання і самонавчання.

Як і іншим складним системам, БС властива ієрархічна структура з вимогою несуперечності цілей за рівнями. Її матеріальна структура охоплює об'єктно-технічну й організаційно-штатну складові, які містять часткову та опосередковану інформацію про ефективність процесу її функціонування. Основна інформація про цей процес міститься у функціональній структурі системи – у складі функцій, їхніх взаємозв'язках і характеристиках. Обґрунтування ефективної структури функцій БС – актуальна науково-прикладна **проблема** важливого значення. Єдності щодо методів її розв'язання немає. Цю статтю варто розглядати як спробу внеску в розв'язання цієї проблеми з опорою на принцип відповідності показника ефективності системи її призначенню і принцип зворотного зв'язку за допомогою розробки графоаналітичних моделей ефективності функціонування БС.

### Ефективність функціонування системи

Процес функціонування системи може бути представлений сукупністю логіко-часових взаємозв'язків типових функціональних одиниць і їх типових блоків, які об'єднуються в процеси вирішення завдань, що надходять, і які вдосконалюються для досягнення мети системи. Визначені логіко-часові взаємозв'язки прийняття рішень і їх виконання освоюються персоналом. Вони можуть скласти ресурс алго/евроритмів, що використовуються БС як основа для вирішення завдань з необхідним коригуванням до уточнених умов.

Комплексна властивість будь-якої військової системи – *ефективність*, під якою розуміють її здатність досягати поставленої мети.

**Мета** ракетних ударів США 14 квітня 2018 р. по об'єктах хімічної зброї Сирії – примус режиму Асада до виконання міжнародних угод про заборону такої зброї. **Збиток** його режимові в результаті ударів – кількість уражених об'єктів, пов'язаних з програмою хімічної зброї. Мета БС досягається через нанесення збитку противнику або запобігання завданню збитку своїм силам (об'єктам, що захищаються). Але мета і збиток – не одне й те саме.

Апріорно мета БС векторна і змінюється, але це не причина переглядати сутність поняття ефективність. Існують дві позиції стосовно векторності цілей. Перша походить від принципу успішності Аристотеля: правильно визначити кінцеву мету і спосіб її досягнення. У [2, с. 40] підкреслюється, що «сили в бою, операції, битві, атаці, ударі переслідують завжди одну мету (за двома зайцями не ганяються)». Протилежною є позиція авторів роботи [1, с. 57], які відзначають як багатовекторність і мінливість мети БС, так і «відсутність формальних критеріїв для прийняття рішення».

На виявлення показника ефективності спрямований фундаментальний принцип відповідності показника ефективності меті системи, введений А. М. Колмогоровим. Він указав на природний характер цієї міри, через що показник ефективності *не можна призначити в наказовому порядку, але можна і потрібно виявити, виходячи з мети системи* [3]. Для систем стрільби ним розглянуті два крайні випадки:

*Випадок 1.* Мета досягається в разі нанесення противнику збитку  $Z$  не меншого за пороговий  $Z_{\text{п}}$ , коли природна оцінка – по ймовірності цієї події

$$W = P(Z \geq Z_{\text{п}}). \quad (1)$$

*Випадок 2.* Для досягнення мети потрібно нанести противнику максимальний збиток, коли природна оцінка в середньому – по математичному очікуванню збитку

$$W = M[Z]. \quad (2)$$

Визначення мети БС не завжди очевидне. Історичні приклади свідчать про складність розв'язання **протиріччя** в точці «збиток противнику або запобігання збитку об'єктам, що захищаються, своїм силам». Іншими словами: якою ціною виправданий успіх? Відповіді на це запитання часто проблематично [4, с. 1; 5, с. 10, 11]. Крім того, при моделюванні БС складно встановити взаємозв'язок параметрів, характеристик і часткових показників по всіх ієрархічних рівнях. При цьому модель БС не цілком визначена, і виникають труднощі з обчисленням показників ефективності системи. Зазначене – наслідок природної складності й невизначеності досліджуваних процесів, а також незавершеності теорії. Це стимулює пошук нових способів подолання невизначеності функції ефективності та умов застосування БС. Але деякі спроби такого пошуку невдалі або повторюють відомі невдачі. Наведемо приклади.

У [6, с. 28, 102] запропоновано показник ефективності застосування БС у вигляді відношення *«збитки/витра-*

*ти» (продуктивність витрат)*. Дефект відношення показників такого роду відомий [7, с. 26]: недолік показника в чисельнику компенсується показником в знаменнику. Тому можна зробити висновок про високу здатність системи вирішувати призначені завдання малоефективною дешевою зброєю. Але цвяхами в сучасному бою не перемогти. Компенсуючий дефект є також у ваговій сумі часткових показників, де не виключене ще й свавілля в задаванні вагових коефіцієнтів.

У роботі [1, с. 315] з розглянутих п'яти типів критеріїв/показників ефективності рекомендовано «використовувати будь-який як самостійно, так і в різних комбінаціях». Такий нігілізм щодо відповідності показника ефективності меті БС нічого спільного з науковим обґрунтуванням не має. Зміна мети відбувається в часі й викликає не свавілля, а необхідність виявлення відповідних показників ефективності в момент постановки чергового завдання, зміни мети БС і прийняття ефективних рішень в умовах, що складаються.

Іноді (1) і (2) сприймаються як альтернатива, що не допускає звернення до додаткових показників. Це не так. Принцип відповідності показника ефективності меті системи та положення (1), (2) стосуються *головного* показника ефективності. Додаткові показники залучати не забороняється, а їх застосування передбачається для розширеної оцінки системи або детального дослідження з виявленням «вузьких місць». Справді, (2) заснована на граничній збіжності середнього арифметичного до математичного очікування збитку за *законом великих чисел*. Але виникає справедливе запитання про правомірність підміни закону розподілу випадкового збитку лише одним, хоча й важливим, його моментом – математичним очікуванням. Адже це призводить до втрати інформації. Дисперсія характеризує розсіювання збитку щодо його середнього. Тому доцільно додатково до (2) оцінювати й дисперсію збитку [7, с. 21]. У разі ж підпорядкування збитку нормальному закону залучення дисперсії додатково до (2) використовують усю інформацію про випадковий збиток, що наноситься противнику.

Для досягнення мети БС необхідно не лише виявити головний показник її ефективності, а й узгодити всі цілі, завдання та функції за рівнями системи з її призначенням. Пріоритет вимоги несуперечності цілей відносять до системного підходу в науці, але не цілком справедливо. Еволюцією військової справи на досвіді поразок і перемог утвердилася вимога узгодженості мети застосування всіх сил, що залучаються до операції. Так, як одну з найсильніших сторін генерала армії І. Д. Черняховського у [8] відзначено його «вміння підготувати операцію, організувати всі види оперативного, тилового, технічного забезпечення і домогтися засвоєння командирами всіх ступенів, усім особовим складом послідовності виконання поставлених завдань». При розробці плану операції традиційно усвідомлюється мета вищого рівня, потім своє місце і роль, ставляться завдання підлеглим і так послідовно по всіх рівнях системи. Цим і досягається відповідність

цілей та узгодженість дій усіх елементів БС [2]. Але крім узгодження цілей, системність при моделюванні бойових дій та операцій передбачає ще й узгодженість кількісних мір, що співвідносяться частковим цілям і задачам по всіх ієрархічних рівнях БС від вершинного до елементного. Несуперечливість часткових цілей необхідно втілити в несуперечливість чисельних показників, характеристик і параметрів логіко-часових взаємозв'язків функціональних елементів – одиниць, із яких будується процес функціонування системи.

### Основи побудови моделі функціонування бойової системи

По суті, проблема полягає в розробці математичної моделі БС, щодо якої немає апріорної ясності за завданнями та показниками, що з ними співвідносяться, і їх зв'язності. Але *принцип відповідності меті* зберігає методологічну силу. Його застосування утруднене через невизначеність внеску результату кожного акту процесу функціонування системи в сумарний збиток противнику. Якщо для БС загалом функція ефективності  $E(z)$  невідома, то вибирається її характер: гранична вона (*випадок 1*) або зростаюча (*випадок 2*), відповідно до можливої реальної ситуації. У формулі для головного показника ефективності

$$W = \int_0^{\infty} E(z) f(z) dz \quad (3)$$

зі щільністю розподілу збитку  $f(z)$  цим випадкам співвідносяться види функції ефективності (рис. 1).

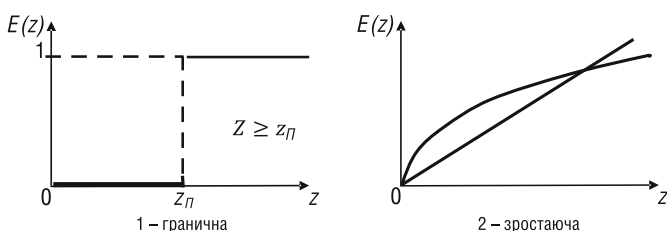


Рис. 1. Види функцій ефективності  $E(z)$

У *випадку 1* відома точка  $z_n$  переходу кількості в якість, результат функціонування БС – подія; показник ефективності – *ймовірнісний*. У *випадку 2* відомо тільки, що чим більше (а для запобігання збитку своїм силам – чим менше), тим краще; показник ефективності – *моментний*.

Дотримання принципу відповідності меті на рівнях параметрів, характеристик, часткових показників моделі функціонування БС можливе при його трактуванні в розширеному вигляді:

*Випадок 1:*

$$W = P(A), \quad (4)$$

де  $A$  – подія, при якій досягається мета виконання відповідного фрагмента процесу функціонування системи.

*Випадок 2:*

$$W = M[X] \quad \text{із доповненням } D[X], \quad (5)$$

де  $X$  – результат виконання фрагмента процесу функціонування, в загальному випадку  $n$ -мірний;

$M[X]$  – його математичне очікування,  $D[X]$  – його дисперсія.

При цьому передбачається застосування методу моментів випадкових результатів на кожному фрагменті процесу функціонування системи. Перехід до ймовірнісної міри (4) здійснюється при з'ясуванні конкретної події, яка співвідноситься до мети його виконання. І так по всіх рівнях БС до розробки моделі її функціонування. Реалізація такого підходу пов'язана з розглядом функціональних властивостей БС, які безпосередньо впливають на її ефективність і зображаються системою випадкових величин – вектором  $X_n$ , і визначенням типових подій, що співвідносяться до мети БС.

Порушення правил та організації функціонування будь-якої системи призводить до недосягнення мети БС та непередбачуваних наслідків. Це підтверджує аналіз наукових досліджень та публікацій історичних подій, які призвели до виникнення аварій і катастроф.

### Звернення до практики

За нашими даними [5], ~ 74% аварійних подій за 20 років експлуатації комплексів протикорабельних ракет (ПКР) у СРСР сталися з причин *людського фактора* – через *помилки* повсякденної експлуатації та під час вогневих вправ за планом бойової підготовки. Аналогічно й у суміжних галузях: втрати транспортних, енергетичних та нафтохімічних компаній зумовлені тим, що від 50% до 80% усіх аварій і зривів технологічного режиму відбуваються через помилки оперативного персоналу [9]. За даними реєстра Ллойда, для суден водотоннажністю 500 тон і більше за рік у середньому відбувається ~ 2000 аварій і катастроф на морі, більшість з них – через помилки як у діях людини, так і у функціонуванні техніки. Наведемо характерні приклади.

У серпні 1981 р. у Чорному морі поблизу острова Зміїний базовий тральщик «Херсонський комсомолец» був уражений ПКР П-35 при виконанні вогневої вправи ракетним крейсером (РКР) «Адмірал Головка» по щиту-мішені. Причина – помилкове цілепоказання оператору-телепілоту ПКР, який виконав його і навів ракету на «Херсонський комсомолец». ПКР без бойової частини пробила надбудову цього корабля. Загинули три людини. Згодом цей самий РКР виконував ракетну стрільбу на Білому морі, ПКР була націлена не на щит-мішень, а на острів Самба Луда, в який і влучила. В обох випадках керівником стрільби і командиром корабля ціль для ураження була визначена неправильно.

У квітні 1987 р. під час навчань на Тихоокеанському флоті СРСР у Японському морі був уражений ракетаю-

мішенню (РМ) «Терміт-Р» і затонув малий ракетний корабель (МРК) «Мусон». Пуцена ракетним катером РМ не була збита МРК, який намагався її вразити, а потрапила в його надбудову, спричинила великі руйнування, пожежу та об'ємний вибух боезапасу: 20 зенітних ракет і 1000 57-міліметрових артснарядів. Основна причина катастрофи – зміна затверджених планів ракетних стрільб кораблів у бік обнуління параметра безпеки – промаху атакуючої РМ «для виконання зенітної стрільби в менш динамічній обстановці». Цим було збільшено час прольоту РМ зони ураження та ймовірність її збиття МРК, але тим самим «Мусон» був перетворений на корабель-мішень. Загинули 39 осіб [10]. При зміні плану стрільб ризик командуванням не оцінювався.

Через три роки на Балтійському флоті при стрільбі з такою самою організацією РМ влучила в МРК «Метеор», але тільки збила кілька антен на його надбудові. Сумний досвід не був урахований. На *рисунку 2* наведено результат влучання ПКР «Прогрес» в український теплохід «Верещагіно» під час виконання ракетних стрільб по щиту-мішені ЧФ/БФ РФ у квітні 2000 р.

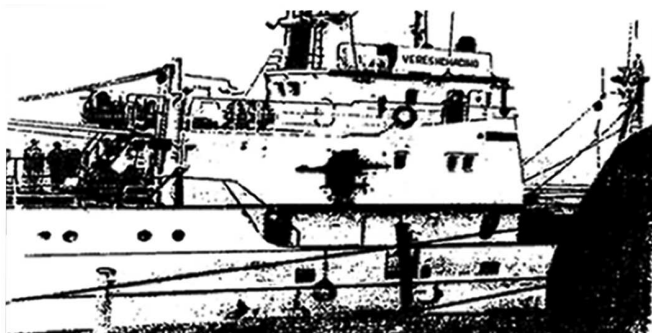


Рис. 2. Ураження ПКР «Прогрес» українського теплоходу «Верещагіно» під час стрільби ЧФ РФ у 2000 р.

Може здатися віддаленою від військової теми катастрофа на ЧАЕС 26 квітня 1986 р. Але нагадаймо, що експлуатувався об'єкт з ураном (190 тонн!) і в результаті людство отримало трагічний урок теплового ядерного вибуху. Катастрофа сталася під час планового експерименту, ідея та організація якого порушували правила експлуатації в переліченому нижче:

- були зняті всі обмеження і заблокований захист (крім аварійної АЗ-5), що заборонялося Регламентом;
- експеримент мислився безпечним, але його організатори ввели (*рис. 3*) ланцюг навантаження для турбогенератора насосами, що охопив електричні та реакторні процеси зворотним зв'язком, небезпека якого не була усвідомлена [11].

Традиційно велика увага приділяється безпомилковості виконавців – операторів систем людина-машина. Розглянуті приклади показують, що докорінні причини аварійності й неуспішності систем – **неадекватні рішення**

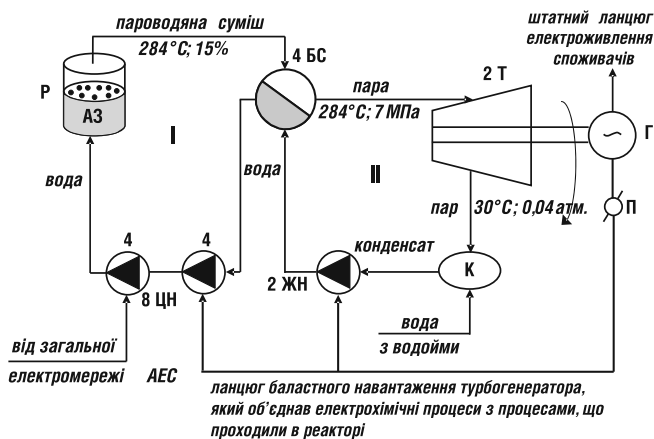


Рис. 3. Теплова схема четвертого блоку ЧАЕС із введеним електроланцюгом зворотного зв'язку в експерименті

ня керівної ланки. Саме ці помилки призводять до недосягнення мети і масштабних негативних наслідків. Тому необхідно враховувати і виключати не лише помилки виконання, а й помилки рішення на всіх рівнях БС.

Таким чином, подія, яка визнається причиною зриву процесу функціонування системи, – **помилка прийняття рішення або його виконання як технічними, так і ергатичними елементами системи, що утрудняє або виключає досягнення її мети.**

Цей висновок тим більш важливий, тому що проблема стійкості систем до помилок «fool-proof concept» визнана важливою на міжнародному рівні. У європейському стандарті (ІЕК 60050-191: 1990, International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Chapter 191: «Dependability and quality of service») термін «збій» не використовується й замінений на поняття «помилка». Тим самим область існування цієї актуальної проблеми розширена до проблеми стійкості систем, до помилок як людини, так і техніки.

**Поняття «помилка» та основні функціональні властивості БС**

- Термін «помилка» застосовується в різних значеннях:
- як характеристика точності вимірювання, управління, наведення (похибка, відхилення, промах, нев'язка);
  - як характеристика оперативності – швидкодії (запізнення, невчасність, затримка, поспішність);
  - у власному розумінні недотримання порядку і правил процесу функціонування системи (порушення, неправильність, помилка).

Така різноманітність термінів відображає особливості основних **функціональних властивостей** систем: **безпомилковості, точності та оперативності (швидкодії),**

а також традиції їх досліджень. Стосовно до БС виразимо цю тріаду властивостей спільним категорійним визначенням:

*Помилка – невідповідність прийнятого рішення меті і стану системи або невідповідність отриманого при його виконанні результату від наміченого цим рішенням.* (6)

Тут важливий поділ відповідальності за співвіднесення мети: безпосередньо – на рішення, а опосередковано – на виконання. При цьому передбачається врахування стану системи (об'єкта управління). Поєднання категорій рішення і виконання передбачається у визначенні (6) необхідним для БС. Інакше розривається процес функціонування системи, і його модель не набуває завершеності.

Зазначеним основним функціональним властивостям співвідносяться випадкові величини:

- число  $R$  помилок (*безпомилковості*);
- час  $T$  виконання (*швидкодії*);
- похибка  $E$  управління (*точності*).

Математичні очікування ( $m_r, m_t, m_e$ ) і дисперсії ( $d_r, d_t, d_e$ ) цих величин є несуперечливими один одному частковими показниками, характеристиками, параметрами фрагментів процесу функціонування системи, з яких він складається. Їх перерахунок здійснюється методом моментів. Спрямованість впливу складових тріади ( $R, T, E$ ) на ефективність БС ясна й однакова: **чим менше, тим краще**. Зауважимо, що ефективність БС залежить не лише від цих властивостей, але ряд вартісних і ресурсних витрат можна оцінити за витратами часу через питомі в одиницю часу. Інші властивості в моделі функціонування БС фіксуються з урахуванням завдання дослідження. Домінуюча властивість визначається призначенням системи. З виокремлених основних функціональних властивостей у навігаційних систем *точність* стає домінуючою властивістю. Якщо розглядається система обробки інформації, то роль домінуючої властивості відводиться *швидкодії* при обмеженні на безпомилковість. Системам навчання операторів зазвичай виділяються планові терміни їх підготовки, тому домінуючою стає *безпомилковість* виконання ними заданих функцій. Навпаки, оцінювання бойової готовності бойових обслуг проводиться за часовими нормативами за умови виконання поставленого завдання безпомилково. Разом з тим, роль домінуючої властивості може змінюватися через дії противника, його тактику, технічну оснащеність та інші фактори. У всіх випадках визначальною є мета системи.

Важлива особливість БС полягає в тому, що збиток противнику, якщо застосовується звичайна зброя, складається із числа уражених його цілей. Як наслідок, при моделюванні, а потім і в керівництвах, правилах та інструкціях переважно зазначаються обґрунтовані і природні межі допустимих відхилень величин. Так, випадкові відхилення снарядів, ракет і торпед від центру цілі обмежені контуром цілі. Це переводить випадкові відхилення у випадкові події *влучання/промах*. Межі зони огляду

РЛС трансформують випадкові координати в події *виявлення/пропуск*. Подібні зміни, а не лише функціональні перетворення одних випадкових величин на інші, властиві різним етапам процесу функціонування і рівням БС. Стосовно випадкових витрат часу вони або підсумовуються або, в разі обмеження допустимого часу, фіксуються як події *встиг/запізнився*. На практиці такі дії, при яких значення похибки й часу вирішення завдань зберігаються в обґрунтованих межах, визнаються правильними. Тим самим *своєчасність* і *точність* згортаються в *безпомилковість*. Відбувається своєрідне, але обґрунтоване перетікання властивостей, оскільки будь-яка класифікація умовна. Зазначене орієнтує на об'єднання творчого й формалізованого підходів до моделювання функціонування БС. Причому друге має слугувати підмогою творчості, її плідному розкриттю.

Використовуваний апарат моделювання повинен бути зручним засобом побудови опорного процесу функціонування. У цьому сенсі відзначимо діаметральність позицій авторитетів:

- у [2, с. 59] категорично стверджується, що «використання при виробленні рішення одного і того самого набору моделей є ознакою шаблонності в мисленні командира: кожне рішення командира повинно бути неповторним»;
- у [12, с. 67] протилежне: «Критика шаблону зовсім не означає його повного заперечення ... винен не шаблон, а те, що таких шаблонів замало».

Розумний компроміс підказує врахування досвіду в суміжних галузях (будівництві та архітектурі, обчислювальній техніці й комунікації тощо), де з невеликого набору типових елементів (цеглинок, блоків) створюється розмаїття корисних їх композицій. Маючи подібний набір *типових блоків дій* і прийомів оперування ними, можна повніше задіяти творчість ОВУ та командира в ініціюванні ідеї та засад вирішення бойового завдання, оскільки технологічне та оціночне робоче навантаження на ОВУ зменшиться. Розробка формул для оцінювання кількісних показників виконання типових блоків дій – теж творча задача, але вона розв'язується завчасно в процесі створення програмного забезпечення діяльності ОВУ. Її результатом має бути обґрунтований процес функціонування БС, який утілюється в план бойових дій, операцій з можливістю його коригування під час виконання в реальних умовах. Громіздку математичну частину моделі процесу функціонування БС слід занурити в програмно-апаратне середовище системи планування та управління бойовими діями (операцією).

#### Вплив зворотного зв'язку на ефективність функціонування БС

Розробка процесу функціонування БС для вирішення властивих їм завдань охоплює введення *зворотних зв'язків* (ЗЗв) як важливого засобу підвищення ефективності функціонування. За допомогою ЗЗв керуюча інформація перетворюється на інформацію стану об'єкта управління (ОУ) й у зворотному напрямку. Дослідники систем

військового управління включають ЗЗв та утворені ними цикли в моделі вдосконалюваних процесів. Але це рідко супроводжується кількісним оцінюванням впливу ЗЗв на ефективність управління БС. Так, у [4, с.123, 229] наводяться типові цикли управління (рис. 4), що ілюструють тільки послідовність підготовки рішення та контролю за його виконанням без урахування їхніх кількісних характеристик.



Рис. 4. Типовий цикл управління БС

У [1, с. 84] рекомендується за моделлю циклу управління БС формувати вимоги до витрат часу. Однобічне врахування часу може надмірно підвищити темп бойової роботи, коли закономірними стають зростання потоку помилок і зрив процесу управління боєм. Зміна стану ОУ та можливість досягнення мети системою в таких концептуальних циклових схемах не відображаються. Кількісно не враховується, що стан ОУ, системи і досягнення мети є випадковими. У військово-наукових дослідженнях зустрічаються не завжди обґрунтовані очікування позитивного ефекту від запровадження контролю в структури управління БС. **Контроль** – ключова функція у зворотному зв'язку таких систем, але її реалізація може не відповідати стану та/або цілі системи. Важливе не лише виявлення помилки в процесі функціонування системи, а й реакція на неї. Наведені вище приклади з практики підтверджують це. Обґрунтованості рекомендацій щодо вдосконалення структури управління БС шляхом введення ЗЗв слугуватиме залучення математичних моделей, які продукуються методом функціональних ергомереж [5]. Викладення методу виходить за рамки даної статті, тому обмежимося прикладами й інтерпретацією моделей цього типу для демонстрації їхніх можливостей щодо кількісного оцінювання ефективності та вироблення практичних рекомендацій з удосконалення БС. Розгляньмо зручну для використання граф-схему рисунка 5, вершини якої співвідносяться:

- *робочій дії P* (фізичній або розумовій, планувальній або виконавчій);
- *контролю K* його правильності (безпомилковості) щодо відповідності мети;
- *відновленню B* стану ОУ.

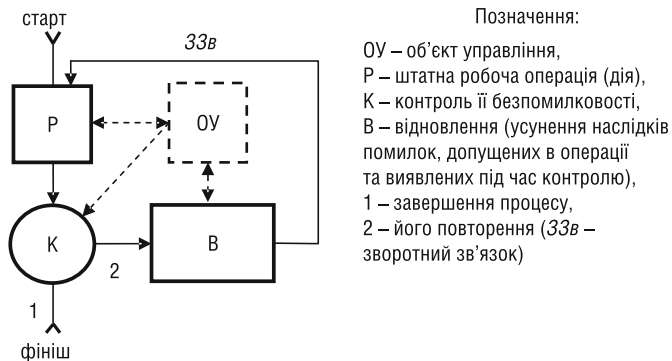


Рис. 5. Типовий блок операцій РКВ

Орієнтованими дугами відображений порядок виконання поставленого завдання з початку до завершення зі зворотним зв'язком. Початкові дані в бінарному випадку:

- імовірності  $S_i$  початкових станів ОУ, умовні ймовірності  $P^{ij}$  його стану  $j$  після дії в стані  $i$ , умовні ймовірності  $K^{ij}$  рішення  $j$  контролю стану  $i$  ОУ, умовні ймовірності відновлення  $B^{ij}$  стану  $j$  ОУ зі стану  $i$  відповідно у вигляді матриць:

$$S = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \end{bmatrix}, \quad P = \begin{bmatrix} P^{11} & P^{12} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$K = \begin{bmatrix} K^{11} & K^{12} \\ K^{21} & K^{22} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ B^{21} & B^{22} \end{bmatrix},$$

припускаючи, що робоча дія не має відновлювальної функції ( $P^{21} = 0$ ), а при відновленні правильності функціонування стан ОУ не погіршується ( $B^{12} = 0$ );

- моментні характеристики витрат часу (ресурсу) на виконання цих функцій у стані  $i$  відповідно:

$$\left. \begin{aligned} p_i, k_i, v_i &- \text{математичні очікування} \\ d_{p_i}, d_{k_i}, d_{v_i} &- \text{дисперсії} \end{aligned} \right\}, \quad (8)$$

де індекси:  $i = 1;2, j = 1;2$  (1 – правильно, успішно, нормально – з дотриманням установлених норм, 2 – помилково, безуспішно, не є нормальним).

За такою схемою процес триває до появи необхідної критеріальної події. Наприклад, до  $n$  успіхів (до першої помилки, до серії  $r$  правильних результатів виконання робочих операцій), до витрати допустимого ресурсу (боєкомплекту) тощо.

#### Безпомилковість виконання завдання

Використовуючи метод функціональних ергомереж, можна показати, що ймовірність безпомилкового виконання завдання – фрагмента процесу функціонування за критерієм до першого успіху є

$$P_B = (S_1 a + S_2 b) \frac{c}{p}, \quad S_2 = 1 - S_1, \quad (9)$$

де параметри:

$$\begin{aligned} a &= 1 - K^{22} B^{22}, \\ b &= K^{22} B^{21}, \\ c &= P^{11} K^{11}, \\ p &= ac + (1 - P^{11})(1 - K^{22}). \end{aligned}$$

Імовірність помилкового виконання завдання складе  $P_0 = 1 - P_B$ .

Позначимо  $P^{11} = P$ ,  $B^{21} = B$  і припустимо, що ймовірності правильного контролю однакові:  $K^i = K$ . Тоді

$$P_B = \frac{PK [S_1(1 - K) + KB]}{PK [1 - K(1 - B)] + (1 - P)(1 - K)}. \quad (10)$$

Оцінимо приріст безпомилковості виконання завдання при вихідних даних:

- імовірність безпомилкового її виконання без контролю та зворотного зв'язку  $P = 0,6$ ;
- імовірність правильного встановлення контролем результатів виконання завдання  $K = 0,9$ ;
- імовірність відновлення правильного функціонування системи  $B = 0,95$ .

Підставляючи ці величини в (10) отримаємо ймовірність безпомилкового виконання завдання системою за структурою *рисунка 5* у лінійній функції від початкового стану готовності

$$P_B = \frac{0,54(0,1S_1 + 0,855)}{0,556} = 0,097S_1 + 0,83,$$

оскільки  $S_1$  – початкова ймовірність стану 1 об'єкта управління (системи).

У найгіршому випадку початкового стану неготовності до безпомилкових дій ( $S_1 = 0$ ) завдання буде вирішене правильно з імовірністю  $P_B = 0,83$ . Якщо  $S_1 = 1$ , то  $P_B \approx 0,93$ . Порівняно з початковими 60% *приріст безпомилковості в 33% за рахунок введення зворотного зв'язку* в систему переконливо підтверджує корисність використання моделей такого типу для вдосконалення управління в БС. Ще переконливіше практичні рекомендації дослідження на моделі, спрямовані на запобігання безуспішності, зниження аварійності, виключення втрати управління (зриву процесу функціонування) БС.

Пояснимо це аналізом функції безпомилковості при  $B = 1$ , коли усунення наслідків помилок і правильність функціонування системи гарантуються за одноразову реалізацію зворотного зв'язку:

$$P_B = \frac{PK}{PK + (1 - P)(1 - K)} (S_1 + KS_2). \quad (11)$$

Якщо процес починається у стані готовності, то  $S_1 = 1$  і функція  $P_B(P, K)$  ілюструється кривими *рисунка 6*.

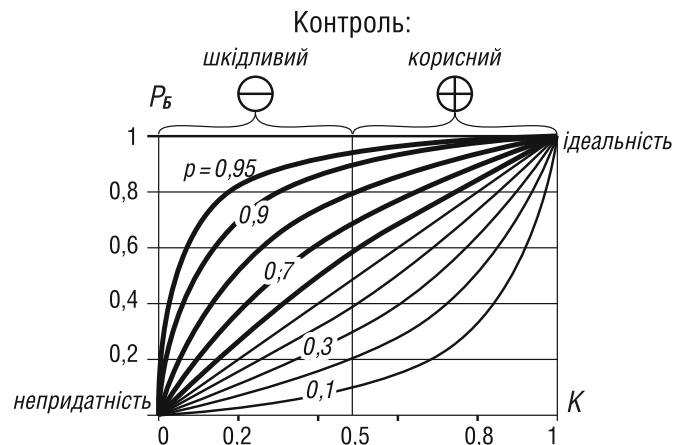


Рис. 6. Залежність  $P_B$  від правильності виконання робочої дії  $p$  і контролю  $K$

Видно, що домогтися безпомилкового виконання завдання при малих шансах правильності контрольованих дій можна тільки за високої якості контролю  $K$  (при  $P < 0,1$  контроль повинен бути практично ідеальний). Але при  $K < 0,5$  *контроль шкідливий*: результуюча безпомилковість менша, ніж у контрольованих дій (ця зона позначена знаком мінус). Такі умови часто виявляються реальними, а наслідки помилок контролюючих осіб – командирів тим масштабніші, чим вищий їхній статус. Контроль повинен здійснюватися професійно на глибину компетентності та відповідальності. Залежність при  $P = 0,95$  показує, що міцні знання і досвідченість практично не потребують контролю, але вони досягаються значними зусиллями при бойовій та індивідуальній підготовці, освоєнні нових зразків озброєння і техніки, формуванні бойової майстерності.

#### Оперативність вирішення завдання (швидкодія системи)

Витрата часу  $T$  виконання завдання БС випадкова. Основні його характеристики – математичне очікування  $M$  (оцінка часу витрат у середньому) і дисперсія  $D$  (характеристика розсіювання), які залежать від вихідних даних і типу результату розв'язання задачі. Обмежимося випадком безпомилкового розв'язання, коли середній час виконання одиничних операцій не залежать від стану ОУ. Можливо показати, що при цьому витрати часу на одноразову реалізацію зворотного зв'язку становлять у середньому

$$M_B = A(\rho + k + v) + (\rho + k) \quad (12)$$

з параметром циклічності

$$A = \frac{1 - p_1}{p_1} + \frac{(1 - a)b}{app_1} P^{12} - \frac{S_2 b}{S_1 a + S_2 b}, \quad (13)$$

де  $p_1 = 1 - (1 - b)P^{11} + b - c$ .

Ми розглядаємо тут не дуже складну схему зі зворотним зв'язком, але параметр циклічності не співвідноситься до відомої схеми незалежних випробувань (стрільб) до першого успіху, коли він є  $1/p_1$ . Це свідчить про необхідність детальних досліджень циклових схем функціонування БС, які можуть бути різноманітними.

При  $S_1 = 1$ ,  $P^{11} = P$ ,  $B^{21} = B$ ,  $K^u = K$  одержимо:

$$A = \frac{1}{p_1} \left\{ \frac{(1-P)(1-a)b[a+c+(1-P)(1-b)]}{a[ac+(a-b)(1-P)]} + P(a-b) + (1-P)b \right\}. \quad (14)$$

У випадку, якщо при цьому одноразове відновлення необхідного стану ОУ гарантоване ( $B = 1$ ), то  $b = K$ ,  $a = 1$ ,  $p_1 = PK + (1-P)(1-K)$  і маємо параметр циклічності

$$A = \frac{P(1-K) + (1-P)K}{PK + (1-P)(1-K)}. \quad (15)$$

Тільки при ще додатковій умові про безпомилковість контролю ( $K = 1$ ) отримуємо середнє число проходжень по зворотному зв'язку  $A = (1-P)/P$  з геометричним розподілом числа кроків до першого успіху з параметром  $P$  – імовірністю успіху в одному випробуванні. Як бачимо, це простий окремий випадок даного процесу.

У реальних процесах застосування БС види зворотного зв'язку розробляються за:

- реалізованими функціями контролю або прогнозу;
- критеріями прийняття рішень і типами обмежень;
- охопленням замкнених частин (блоків, фрагментів) процесу функціонування;
- типом об'єктів управління й числом їхніх станів;
- за іншими класифікаційними ознаками і, можливо, іншою їхньою природою.

ЗЗв охоплюються послідовні дії, їх блоки з урахуванням можливих альтернативних способів вирішення завдань і їх поєднання за часом. Отримана повна модель процесу функціонування системи поетапно перераховується за формулами його показників основних її властивостей та агрегується у природний показник ефективності бойової системи.

## Висновки

1. Ключова подія, що призводить до неуспішності й аварійності експлуатації ОВТ, організаційно-технічних систем – помилка ергатичних або технічних елементів. Вона з'являється як порушення відповідності меті, встановлених норм при функціонуванні системи і призводить до зриву процесу її ефективного функціонування з масштабними негативними наслідками.

2. Формалізація функціонування БС можлива при розширеному трактуванні принципу відповідності меті показника її ефективності та характеристик і параметрів по всіх рівнях прийняття рішень та їх виконання як людиною, так і технікою. При цьому ефективність БС

розглядається через основні функціональні властивості: правильність, швидкість і точність рішень та їх виконання з покладанням відповідальності за рішення на органи управління, а не на виконавців.

3. Принцип зворотного зв'язку успішно застосовується при вдосконаленні технічних систем у безперервних процесах, плідний і на додачу до дискретного, перервного функціонування БС. Кількісне оцінювання впливу зворотного зв'язку на здатність БС досягати мету можливо і зручно проводити за ергомережними графоаналітичними моделями. У них ураховується взаємозалежність основних властивостей БС, ресурсна плата за збільшення ефекту й можливості запобігання зриву управління.

4. Різноманітність типів і форм включення зворотних зв'язків у планувальну, управлінську та виконавчу діяльність елементів БС утворює велике поле досліджень з реалізацією корисних рекомендацій щодо їх удосконалення на основі кількісного оцінювання внеску в ефективність системи загалом.

## Перелік літератури

1. Соловьев И. В. Современные проблемы управления силами ВМФ: Теория и практика. Состояние и перспективы / И. В. Соловьев и др.; под ред. В. И. Куроедова. – СПб. : Политехника, 2006. – 432 с.
2. Волгин Н. С. Исследование операций: учебник. – Ч. 1 / Н. С. Волгин. – СПб. : ВМА им. Н. Г. Кузнецова, 1999. – 590 с.
3. Колмогоров А. Н. Число попаданий при нескольких выстрелах и общие принципы оценки эффективности систем стрельбы / А. Н. Колмогоров // Труды Математического института им. В. А. Стеклова. – 1945. – Вып. 12.
4. Ткаченко В. І. Теорія прийняття рішень органами військового управління : монографія / В. І. Ткаченко та ін.; за ред. В. І. Ткаченка, Е. Б. Смірнова. – Х. : ХУПС, 2008. – 545 с.
5. Чабаненко П. П. Исследование безопасности и эффективности функционирования систем человек-техника эргосетями / П. П. Чабаненко. – Севастополь : АВМС им. П. С. Нахимова, 2012. – 162 с.
6. Педченко Г. М. Военно-научное обеспечение операций войск (сил) / Г. М. Педченко, А. І. Невольниченко, В. І. Шарий; за ред. В. І. Шарого. – К. : ВІКНУ, 2011. – 188 с.
7. Вентцель Е. С. Исследование операций / Е. С. Вентцель. – М. : Сов. радио, 1972. – 552 с.
8. Гареев М. А. О выработке у офицеров качеств и навыков, необходимых для проявления высокого уровня военного искусства / М. А. Гареев // Военная мысль. – 2017. – № 12. – С. 65–76.
9. Буров О. Ю. Эргономичные основы разработки систем прогнозирования работоспособности человека-оператора на основе психофизиологических моделей деятельности: автореф. дис. на звание наук. ступеня доктора техн. наук: спец. 05.01.04 «Эргономика» / О. Ю. Буров. – Харьков, 2007. – 40 с.
10. Пасько Г. Гибель корабля «Муссон» / Г. Пасько // «We/Мы». – 1992. – Ноябрь.
11. Горбачев Б. Чернобыльская авария. Причины, хроника событий, выводы / Б. Горбачев [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://n-t.ru/tp/ie/ca.htm>.
12. Абчук В. А. Теория риска в морской практике / В. А. Абчук. – Л. : Судостроение, 1983. – 150 с.