Загальні питання

УДК 519.872.8

DOI: 10.30748/nitps.2021.45.16

І.В. Корнієнко¹, С.П. Корнієнко¹, В.А. Дмитрієв², А.Г. Павленко², Д.О. Камак²

¹Національний університет “Чернігівська політехніка”, Чернігів

²Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки, Чернігів

РОЗРОБКА МОДЕЛІ ПІДГОТОВЧОГО ЕТАПУ ВИПРОБУВАНЬ ОВТ: МОДЕЛЬ ПРОДУКТИВНОСТІ ВИПРОБУВАЛЬНОГО ПІДРОЗДІЛУ

У статті розглянуті питання математичного моделювання процесів випробування, а саме забезпечення необхідної пропускної здатності випробувального підрозділу на підготовчому етапі випробувань. Здійснена деталізація раніше розглянутої загальної схеми процесів випробування, представленої у вигляді графічної моделі системи масового обслуговування. Відокремлені часові інтервали підготовчої стадії та стадії практичного випробування, які утворюють дві послідовні системи масового обслуговування. Виконана декомпозиція системи масового обслуговування підготовчої стадії до рівня окремого випробувального підрозділу, який в свою чергу представляється підсистемою системи масового обслуговування. Обґрунтовується використання значення математичного сподівання кількості фахівців одного підрозділу у випробувальній бригаді для формування кількості каналів аналітичної моделі підсистеми масового обслуговування.

На основі типових аналітичних моделей систем масового обслуговування формуються показники якості функціонування випробувального підрозділу. Здійснюється аналітичне моделювання підготовчого етапу на рівні випробувального підрозділу. Результати моделювання представлені у графічному вигляді, зроблені загальні підсумки та рекомендації.

Ключові слова: випробування, озброєння та військова техніка, моделювання, система масового обслуговування.

Вступ

Постановка проблеми. Ситуація, що склалася на сьогодні у країні, обумовлює реальну потребу проведення масових випробувань новітніх зразків озброєння та військової техніки (ОВТ). Мінімізація затримок у проведенні випробувань, при забезпеченні належної якості результатів випробування, сприятиме своєчасному прийняттю зразків на озброєння у Збройних Силах України, і відповідно, збільшенню обороноздатності держави, що надзвичайно важливо в умовах гібридної агресії Російської Федерації.

Відповідно до чинного законодавства, завдання з випробування зразків ОВТ покладено на Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки (ДНДІ ВС ОВТ). Дослідженню підлягає доволі широкий спектр видів ОВТ різної складності та комплексності, при цьому, випробування проводяться за різних умов та особливостей. Природньо, що забезпечення своєчасних та якісних випробувань, крім таких важливих факторів як: готовність зразка до випробувань, розвиненість полігонно-виміральної бази та метрологічного забезпечення (на сьогодні ці два фактора є одними з головних проблем), підготовле-

ність та навченість фахівців-випробувачів, науково-методичного, матеріально-технічного забезпечення тощо, залежить, у тому числі, і від оптимальних режимів і алгоритмів роботи випробувальної установи. Одним з ефективних і порівняно-невитратних методів відшукування оптимальних рішень є математичне моделювання, яке не вимагає втручання в процес функціонування досліджуваної системи. Для нашої проблеми це є одним з найважливіших чинників, що робить цей метод дослідження пріоритетним, так як не потребує будь-якого втручання у перебіг планового режиму випробувань.

Зважаючи на динамічність випробувальних процесів, періодичне одержання ззовні системи випробувальних зразків (над якими потрібно виконати певні дії) та стохастичність майже всіх процесів у системі (починаючи з інтенсивності надходження зразків на випробування, умов проведення випробувань, одержуваних результатів, внутрішніх параметрів випробувальної установи тощо) доцільним є застосування добре розвинуеного апарату теорії систем масового обслуговування (СМО) [1–3]. При цьому, випробувальні зразки представляються заявками, випробувальна організація – СМО, а випробування здійснюються випробувальними бригадами, які утворюють канали СМО. Заявки, що не

обслужені внаслідок зайнятості каналів одразу при надходженні, утворюють черги. Таке представлення процесу випробувань, при визначенні основних статистичних характеристик та системних параметрів випробувальної установи, дає змогу провести аналіз ефективності функціонування та визначити можливі напрями оптимізації в організації випробувальної діяльності.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Загальні положення щодо проведення випробувань ОБТ в Україні зазначені у низці нормативно-правових актів, наприклад [4–6]. На сьогодні існує велика кількість робіт, де розглядається методологія проведення експериментів і випробувань, наприклад [7–9], у тому числі й військової техніки [10], проте, у наукових колах не зменшується увага до питання підвищення якості процесу і результатів випробувань, наприклад [11–14].

З урахуванням масштабності та системності при проведенні випробувань у ДНДІ ВС ОБТ, у [15] авторами запропоновано використання теорії СМО для дослідження процесів, що відбуваються під час випробувальної діяльності установи. Метою такого дослідження є пошук шляхів підвищення ефективності випробувальної діяльності, які ґрунтуються на методах аналізу й оптимізації, що викладені у фундаментальних і прикладних роботах [1–3; 16–18], які й на сьогодні є актуальними. Приклад сучасного вдалого застосування апарату СМО у військовій справі наведений у [19].

У [20] авторами проведено статистичний аналіз вхідного потоку заявок на випробування і здійснене формування його основних параметрів, на основі якого у [21] здійснено формування загального бачення моделі випробувальної установи.

Виділення недосліджених раніше частин загальної проблеми. Аналітичне та імітаційне дослідження функціонування випробувальної установи з використанням математичного апарату СМО вимагає пошуку адекватної моделі, а у випадку відсутності такої – розробки нової моделі, яка буде враховувати особливості випробувальної діяльності організації. Існує багато факторів, які впливають на успішність проведення масових випробувань ОБТ, таких як: забезпеченість полігонно-вимірювальною базою; досвідченість та методична підготовленість фахівців-випробувачів; організаційна структура організації; підготовленість зразків до випробувань; рівномірність структури потоку заявок на випробування зразків ОБТ (стаціонарність потоку зразків ОБТ та їх рівномірний розподіл по видах, і відповідно, рівномірна зайнятість структурних підрозділів випробувальної організації), а також множина інших чинників, які безпосередньо або опосередковано впливають на хід випробувань. Представлення випробувальної організації у вигляді СМО та моделю-

вання основних процесів, які супроводжують випробування, дозволить відповісти на декілька цікавих для нас питань:

- як взаємодіють ці фактори і який вплив вони чинять на успішність і своєчасність проведення випробувань;
- яким чином можна збільшити пропускну здатність випробувальної організації не збільшуючи штатну структуру;
- які процеси і етапи випробувань є критичними для успішного проведення масових випробувань.

У даній статті розглядається моделювання випробувальної установи у часовому інтервалі від надходження заявки на випробування до початку практичної фази випробування, що відповідає підготовчому етапу випробувань.

Постановка задачі. Проаналізувати особливості надходження заявок на випробування зразків ОБТ, визначити критерії ефективності та розробити модель СМО підготовчого етапу випробувань, взявши за основу типові моделі СМО.

Виклад основного матеріалу

Підготовчий етап випробувань визначається діями з розробки програми, методик, плану випробування та плану матеріально-технічного забезпечення, а також опрацюванням інших організаційних і технічних документів, що, знов таки, потребує певного часу, і певною мірою впливає на пропуску здатність випробувальної організації. Зауважимо, що на підготовчому етапі виконуються й інші види робіт, такі як: листування з керівними установами та розробниками випробуваного зразка, попереднє вивчення зразка, призначення відповідальних за розробку науково-методичних та планових документів випробувань, відбір та навчання випробувальної бригади, підготовка полігонно-вимірювальної бази тощо. Проте, такі процедури носять, як правило, сталий у часі характер і їх прогнозування не викликає жодних ускладнень. Тут для нас є цікавим питання пропускну здатності випробувальної установи на підготовчому етапі за умови безперервного надходження заявок на випробування при відомих параметрах потоку заявок та основних статистичних характеристик продуктивності випробувальної організації.

У [21] наведена загальна схема представлення випробувальної організації у вигляді СМО виду М/М/п. Авторами проведено уточнення структури черги очікування заявок на випробування (рис. 1), у якій відокремлені етапи первинного надходження заявки до СМО і її повторного надходження, яке відбувається у випадку зняття зразка з випробувань внаслідок виявлення в процесі випробувань недолі-

ків та повторного надходження зразка на випробування після усунення недоліків.

Розглянемо докладно моменти надходження на випробування зразків ОВТ. Для приведеної схеми (рис. 1) час очікування у черзі для заявок, що вперше надійшли на випробування, $\omega_n = (\omega_n^t + \omega_n^q) + \omega_n^c$, де ω_n^t – час очікування при виконанні технологічних процесів підготовки до випробувань зразка за заявкою C_n ; ω_n^q – час очікування заявки внаслідок зайнятості i -го каналу на підготовчому етапі; ω_n^c – час очікування заявки внаслідок зайнятості i -го каналу обслуговування (випробування). Відповідно, для заявок, що надійшли повторно, і не потребують підготовчих дій, $\omega_n = \omega_n^c$. Загальну статистичну оцінку характеру перебування заявок у черзі можна одержати з числових характеристик статистичного розподілу часу перебування заявки у черзі на обслуговування – математичне сподівання $M^*[\omega_n]$, дисперсії $D^*[\omega_n]$ та середньоквадратичного відхилення $\sigma^*[\omega_n]$. Такі оцінки були одержані на основі

статистичної обробки генеральної сукупності даних за чотири роки. Статистичні оцінки часу перебування заявки у черзі визначались для планових ω_n і фактичних ω'_n показників. Час перебування у черзі визначався з дати розпорядження про проведення випробування зразку до початку фази практичного випробування. Отже, математичне сподівання $M^*[\omega_n] = 20,27$ і $M^*[\omega'_n] = 21,28$; дисперсія $D^*[\omega_n] = 734,20$ і $D^*[\omega'_n] = 777,02$; середньоквадратичне відхилення $\sigma^*[\omega_n] = 27,09$ і $\sigma^*[\omega'_n] = 27,87$. Оцінки проводились з урахуванням прийнятої часової одиниці $\Delta t = 1$ тиждень. Імовірність затримок у випробуванні $P(\omega_n \neq \omega'_n) = 0,12$. Математичне сподівання затримки $M^*[\omega_n \neq \omega'_n] = 0,59$, дисперсія $D^*[\omega_n \neq \omega'_n] = 11,97$, середньоквадратичне відхилення $\sigma^*[\omega_n \neq \omega'_n] = 3,46$. Статистична ймовірність успішних випробувань $P^*(C_n) = 0,85$.

Рис. 1. Представлення випробувальної організації у вигляді СМО з виділеним підготовчим етапом
Джерело: розроблено авторами.

Для подальшого моделювання наведено також параметри вхідного потоку заявок на випробування [20–21]: статистичне математичне сподівання кількості заявок на випробування за тиждень $M^*[\alpha(\Delta t)] = 1,83$, статистична дисперсія $D^*[\alpha(\Delta t)] = 1,95$ та статистичне середнє квадратичне відхилення $\sigma^*[\alpha(\Delta t)] = 1,39$. Характер вхідного потоку відповідає показниковому закону розподілу з параметром Пуассона $\lambda \approx 1,94$.

Дослідження часових інтервалів між суміжними заявками здійснювалось за календарним графіком їх надходження. Якщо заявки надходили в один день, то часовий інтервал між ними $\Delta t_{ij} = 0$. В результаті обробки генеральної сукупності статистичних даних загальної кількості інтервалів $n_{\Delta t} = 1461$, одержали наступні результати: математичне сподівання часового інтервалу між заявками $M[\Delta t] = 2,71$, середньоквадратичне відхилення $\sigma[\Delta t] = 2,97$, коефіцієнт варіації $v = 1,09$.

Модель підготовчого етапу випробувань. Особливістю функціонування випробувальної організації при представленні його у вигляді СМО є цільове призначення каналів СМО конкретним видам зразків ОБТ, які надходять на випробування. Тобто, певний зразок, що надійшов на випробування, має бути обслуговуваний тільки визначеним каналом (каналами), що пов'язане з потребою у профільних за видом ОБТ фахівців. Якщо необхідний канал (або хоча б один з таких каналів) зайнятий, то заявка на

обслуговування становиться у чергу. Відповідно, інші канали, навіть якщо вони є вільними, не можуть обслуговувати “чужу” заявку. Тут зауважимо, що однією з задач оптимізації СМО є визначення кількості каналів, що обслуговують вхідний потік; у нашому випадку канали, що представлені на рис. 1, є унікальними за власним фаховим призначенням (канал відповідає структурному підрозділу випробувальної організації, який відповідає за певний вид ОБТ). Варіювання кількості каналів не є доцільним, так як їх зменшення або збільшення визначає фактичне розгалуження вхідного потоку по різних каналам (або спрямування різнорідних ОБТ в один канал), і при тій самій кількості фахівців не слід очікувати приросту пропускної здатності.

Кожен канал (тобто кожен випробувальний підрозділ) може налічувати різну кількість фахівців-випробувачів, що певною мірою обумовлює різну пропускну здатність каналів випробувальної установи. Одразу зауважимо, що на пропускну здатність також впливатиме інтенсивність обслуговування заявок, складність та комплексність випробувальних зразків, зайнятість фахівців іншими видами робіт тощо. Для адекватного моделювання функціонування випробувальної організації кожен окремий канал випробувальної установи можна представити у вигляді власної СМО (далі називатимемо її підсистемою СМО, або ПСМО), яка буде одноканальною, якщо структурний підрозділ налічує лише одного фахівця, і багатоканальною у іншому випадку (рис. 2).

Рис. 2. Представлення каналу випробувальної установи у вигляді ПСМО підготовчого етапу
Джерело: розроблено авторами.

На схемі рис. 2 “Випробувальний підрозділ” є обслуговуючим пристроєм (позначений цифрою (2)), “Черга заявок однієї групи” (позначена цифрою (1)) є чергою, утворюваною заявками, які одержали відмову у негайному обслуговуванні внаслідок зайнятості каналів обслуговуючого пристрою. Вихідний потік заявок обслуговуючого пристрою (2) потрапляє на

обслуговуючий пристрій “Випробування” (див. рис. 1), якщо канали випробування зайняті, то утворюється черга (3), але вже до обслуговуючого пристрою “Випробування”. З цих міркувань, моделювання підготовчого етапу у вигляді ПСМО має враховувати лише елементи (1) і (2) схеми, що наведена на рис. 2, а черга (3) є елементом ПСМО “Випробування”.

Вихідний потік заявок ПСМО підготовчого етапу є вхідним потоком ПСМО випробування, тобто утворюється ланцюг з двох послідовно з'єднаних СМО. Проте, як видно зі схеми (рис. 1), деякі заявки потрапляють безпосередньо на вхід ПСМО “Випробування”, оминаючи ПСМО “Підготовчий етап”. Відповідно слід очікувати, що інтенсивність вхідного потоку ПСМО “Випробування” буде більшою, ніж вхідного потоку ПСМО “Підготовчий етап” на величину

$$\lambda' = \Lambda(1 - P^*(C_n)), \quad (1)$$

де Λ – інтенсивність загального вхідного потоку заявок.

Відповідно інтенсивність потоку заявок на вхід ПСМО “Підготовчий етап” становитиме

$$\lambda = \Lambda - \lambda'. \quad (2)$$

Рівності (1) і (2) справедливі, так як у [20] встановлено експоненціальний закон розподілу часових інтервалів між вхідними заявками, що зводить вхідний потік до “простішого” (Пуассонівського), для якого $\Lambda = \sum_i \lambda_i$ [1; 18].

Рис. 3. Діаграма переходу станів ПСМО підготовчого етапу за схемою марківських процесів
Джерело: розроблено авторами.

В такому представленні функціонування СМО виникає ситуація, коли заявка може обслуговуватись декількома каналами (декілька фахівців задіяні у підготовчому до випробувань процесі), що суттєво ускладнює аналітичний опис показників якості СМО. Для запобігання цьому, при моделюванні масових процесів можна вважати, що один канал обслуговує бригада, що складається з певної кількості фахівців для обслуговування заявок саме для m -го каналу. Це потребуватиме попередньої обробки статистичних даних по підготовчих етапах випробування, проте суттєво спростить саму модель СМО. Далі вважатимемо, що $\bar{k}$ – математичне сподівання числа фахівців, зайнятих у підготовчому етапі випробувань однієї заявки; тоді максимальна кількість

Для подальшого аналітичного опису схему рис. 2 відобразимо за схемою марківських процесів (рис. 3).

На схемі рис. 3 m -а ПСМО (m -й структурний підрозділ) налічує K фахівців випробувачів, λ_m – інтенсивність потоку заявок, μ_m – інтенсивність обслуговування заявок. Заявка на випробування, яка потрапляє у ПСМО, обслуговується як мінімум 1 фахівцем відділу (нагадаємо, що в даному випадку розглядається підготовчий етап випробувань). ПСМО може перебувати в одному з $K+1$ станів:

S_m^0 – всі фахівці вільні, ПСМО повністю простояє;

S_m^k – зайнято k фахівців, у підсистемі $i \leq k$ заявок на випробування;

S_m^K – зайнято K фахівців, у каналі $i \leq K$ заявок на випробування; канал повністю зайнятий, наступні заявки одержують відмову в обслуговуванні і ставляться у чергу.

заявок у системі (станів каналу) становитиме $I = \left\lceil \frac{K}{\bar{k}} \right\rceil$. Природно припустити, що інтенсивність обслуговування заявок зростатиме пропорційно значенню $\bar{k}$, тоді діаграма переходу станів каналу (рис. 3) перетвориться до наступного вигляду (рис. 4). Тут $B = \left\lceil \frac{K}{\bar{k}} \right\rceil$. Діаграма рис. 4 не враховує можливість очікування заявки внаслідок можливої зайнятості всіх фахівців, коли канал знаходиться у стані S_m^B . У цьому разі утворюється черга, довжина якої теоретично необмежена. Тоді діаграма переходу станів каналу матиме наступний вигляд (рис. 5).

Рис. 4. Діаграма переходу станів ПСМО випробувальної організації
Джерело: розроблено авторами.

Рис. 5. Діаграма переходу станів ПСМО з необмеженою чергою
Джерело: розроблено авторами.

Відсутність кінцевого елемента (рис. 5) характеризує потенційно-нескінченну чергу. Рівняння балансу для станів m -ї ПСМО наступні (з рівнянь Колмогорова-Чемпмена [1–2; 18]):

канал знаходиться у стані S_m^0 : всі фахівці вільні; у ПСМО немає заявок на випробування:

$$S_m^0: \lambda_m P_m^0 = \bar{k} \mu_m P_m^1; P_m^1 = \frac{\lambda_m}{\bar{k} \mu_m} P_m^0 = \rho_m P_m^0,$$

де: P_m^0 – імовірність знаходження ПСМО у стані S_m^0 ,

P_m^1 – імовірність знаходження каналу у стані S_m^1 ,

$\rho_m = \frac{\lambda_m}{\bar{k} \mu_m}$ – навантаження m -ї ПСМО;

ПСМО знаходиться у стані S_m^b : $(K - b\bar{k})$ фахівців перебуває у “резерві”; у каналі b заявок на випробування:

$$S_m^b: \lambda_m P_m^b = (b+1) \bar{k} \mu_m P_m^{b+1}; P_m^{b+1} = \left(\frac{\rho_m}{(b+1)!} \right) P_m^0;$$

ПСМО знаходиться у стані S_m^B : всі фахівці зайняті; у ПСМО B заявок на випробування; наступна заявка одержує відмову і потрапляє у чергу:

$$S_m^B: \lambda_m P_m^{B-1} = B \bar{k} \mu_m P_m^B; P_m^B = \left(\frac{\rho_m}{B!} \right) P_m^0.$$

Використаємо відомі співвідношення для стаціонарних імовірностей багатоканальних СМО з необмеженою чергою [1–3; 16–19; 22]. Відповідно, аналіз продуктивності СМО має сенс за умови існування стаціонарного стану системи – такого стану, при якому не відбувається нескінченного зростання черги на обслуговування. Це відбувається при умові

$$\frac{\rho_m}{B} < 1, \text{ або}$$

$$\frac{\lambda_m}{\bar{k} \mu_m} < B. \quad (3)$$

Тоді стаціонарна імовірність знаходження m -ї підсистеми у стані S_m^0 :

$$P_m^0 = \left(\sum_{b=0}^B \frac{\rho_m^b}{b!} + \frac{\rho_m^{B+1}}{B!(B-\rho_m)} \right)^{-1};$$

стаціонарна імовірність знаходження m -го ПСМО у стані S_m^b :

$$P_m^b = \frac{\rho_m^b}{b!} P_m^0;$$

стаціонарна імовірність знаходження ПСМО у стані S_m^{B+r} :

$$P_m^{B+r} = \frac{\rho_m^{B+r}}{B! B^r} P_m^0.$$

Оптимальна робота m -ї ПСМО підготовчого етапу може бути проаналізована за наступними показниками продуктивності [1–3; 16–19; 22]:

стаціонарна імовірність відмови заявці в обслуговуванні на підготовчому етапі і переміщення її у чергу:

$$P_{vidm} = P_m^B = \left(\frac{\rho_m^B}{B!} \right) P_m^0;$$

відносна пропускна здатність (стаціонарна імовірність безупинного обслуговування заявки):

$$P_{obsl} = 1 - P_m^B = 1 - \left(\frac{\rho_m^B}{B!} \right) P_m^0;$$

або з урахуванням того, що у ПСМО знаходиться $b < B$ заявок, тобто $b = 0, B-1$, то:

$$P_{obsl} = \sum_{b=0}^{B-1} P_m^b = P_m^0 \sum_{b=0}^{B-1} \frac{\rho_m^b}{b!};$$

абсолютна пропускна здатність (для систем з необмеженою чергою часто приймають $Q_m = 1$, так як в будь-якому випадку заявка пройде через СМО, проте нас цікавить потік заявок, що проходить через ПСМО без постановки у чергу):

$$Q_m = \lambda_m P_{obsl};$$

коефіцієнт простою:

$$P_0 = \left(\sum_{b=0}^B \frac{\rho_m^b}{b!} \right)^{-1};$$

середня кількість каналів ПСМО, зайнятих обслуговуванням:

$$N_m^b = \frac{\lambda_m}{\bar{k} \mu_m} = \rho_m;$$

коефіцієнт завантаження ПСМО:

$$\eta_m = \sum_{b=1}^B S_m^b P_m^b = \rho_m (1 - P_m^0);$$

середня кількість зайнятих фахівців:

$$\bar{N}_k = \bar{k} \rho_m = \frac{\lambda_m}{\mu_m};$$

середнє число заявок у черзі:

$$N_m^q = \frac{P_m^0 \rho_m^{B+1}}{B! B (1 - \rho_m/B)^2};$$

середнє число заявок у ПСМО:

$$N_m = N_m^b + N_m^q;$$

середній час простою ПСМО:

$$t_m^0 = P_0 T,$$

де T – період аналізу системи;

середній час очікування заявки у черзі:

$$\bar{\omega}_m^q = N_m^q / \lambda;$$

стаціонарний середній час перебування заявки у підсистемі:

$$\bar{\omega}_m = \frac{1}{k \mu_m} + \bar{\omega}_m^q;$$

стаціонарна середня кількість заявок у ПСМО:

$$\bar{N}_m = \lambda_m \bar{\omega}_m.$$

Отже, маючи доволі широкий перелік показників продуктивності ПСМО, наближені характеристики випробувальних підрозділів та статистичні параметри вхідного потоку заявок на випробування можна дослідити чутливість та адекватність поведінки запропонованої моделі. Враховуючи, що ми досліджуємо функціонування окремого каналу, скористаємось даними, що наведені у [20] для підпотоків заявок на випробування зразків ОВТ. Підпотоки s_i були сформовані відповідно до прийнятої системи класифікації ОВТ у ДНДІ ВС ОВТ, і по яких здійснюється звітність (види ОВТ позначені порядковими цифрами). Значення математичного сподівання – $\bar{m}_m$, дисперсії – D_m , середнього квадратичного відхилення – σ_m кількості заявок, які надійшли на випробування за інтервал часу один тиждень, а також обчислені інтенсивності підпотоків – λ_m наведені у табл. 1.

Зауважимо, що наведені у табл. 1 групи ОВТ не в повній мірі відповідають каналам (випробувальним підрозділам) установи – певні групи обслуговуються одним каналом або розгалужуватися по декільком. Крім того, наведені оцінки не є остаточними характеристиками завантаженості окремого каналу, так як певні фахівці (наприклад, зв'язківці)

можуть бути задіяні для випробування ОВТ, що відносяться до різних груп ОВТ (наприклад, при комплексному випробуванні автомобільної, бронетанкової або авіаційної техніки тощо).

На даному етапі розгляду проблеми для моделювання була обрана група s_{10} (як відокремлений вид ОВТ), тоді вважатимемо $\lambda_{10} = 0,127$. Вважаючи, що у функціонуванні ПСМО ми можемо впливати лише на параметри кількості фахівців у випробувальному підрозділі, кількості фахівців у бригаді, що обслуговують заявку та, певною мірою, на інтенсивність обслуговування (наприклад за рахунок автоматизації певних процесів), то подальше моделювання буде здійснюватись при варіюванні цими параметрами.

Моделювання і аналіз ПСМО здійснювалось для інтервалу $\bar{k} \in [1; 5]$. Для наближеного визначення інтенсивності обслуговування заявок на підготовчому етапі використаємо одержане математичне сподівання фактичного часу перебування у черзі $M^*[\omega'_n] = 21,28$. Тоді можна очікувати, що математичне сподівання інтенсивності обслуговування буде близьким або більшим за величину $M^*[\mu_m] \geq 1 / M^*[\omega'_n] = 0,046$. Нерівність обґрунтована тим, що на підготовчому етапі відбувається не лише обслуговування заявок, а також їх вимушене очікування, внаслідок втрати часу під час листування з керівними установами (замовником), або елементарної зайнятості каналів обслуговування.

Таблиця 1

Параметри підпотоків за групами ОВТ

	s_1	s_2	s_3	s_4	s_5	s_6	s_7	s_8	s_9	s_{10}	s_{11}	s_{12}
$\bar{m}_m$	0,102	0,025	0,032	0,081	0,021	0,035	0,011	0,014	0,127	0,071	0,120	0,004
D_m	0,151	0,024	0,037	0,079	0,021	0,034	0,010	0,014	0,153	0,099	0,163	0,004
σ_m	0,388	0,154	0,193	0,281	0,143	0,183	0,102	0,118	0,391	0,314	0,404	0,059
λ_m	0,183	0,044	0,057	0,145	0,038	0,063	0,019	0,025	0,228	0,127	0,215	0,006
	s_{13}	s_{14}	s_{15}	s_{16}	s_{17}	s_{18}	s_{19}	s_{20}	s_{21}	s_{22}	s_{23}	s_{24}
$\bar{m}_m$	0,032	0,018	0,057	0,018	0,039	0,120	0,018	0,028	0,011	0,007	0,007	0,004
D_m	0,030	0,024	0,073	0,017	0,037	0,149	0,024	0,034	0,018	0,007	0,007	0,004
σ_m	0,174	0,156	0,270	0,131	0,192	0,386	0,156	0,185	0,132	0,084	0,084	0,059
λ_m	0,057	0,032	0,101	0,032	0,070	0,215	0,032	0,051	0,019	0,013	0,013	0,006

Джерело: розроблено авторами [20, с. 100].

Враховуючи, що така інтенсивність властива при обслуговуванні бригадами випробувачів, то продуктивність одного фахівця становитиме

$$\mu = \frac{M^*[\mu]}{\bar{k}} \approx 0,01...0,05.$$

На підставі цього, встановимо діапазон зміни інтенсивності обслуговування одним фахівцем $\mu = 0,01...0,2$, суттєво зсунувши верхню межу інтенсивності обслуговування для

аналізу поведінки ПСМО при збільшенні продуктивності фахівців.

Для визначення допустимих значень μ_m , при якій виконується умова (3), припустимо штатну чисельність випробувального підрозділу 12 осіб. Також, для дослідження моделі припустимо, що на підготовчий етап випробувань підрозділ може виділити до 40 % бюджету робочого часу (решта часу

зайнято іншими задачами, як то проведенням реальних випробувань, вдосконаленням полігонно-випробувальної бази, науково-дослідною, організаційною або іншими видами робіт). Тоді графік на рис. 6 відображає нижню межу можливих значень інтенсивності обслуговування випробувальною бригадою μ_m для різних значень $\bar{k}$, при якій виконується умова існування кінцевих імовірностей для ПСМО.

Рис. 6. Нижня межа інтенсивності обслуговування

$$\mu_m = \mu(\bar{k})$$

Джерело: розроблено авторами.

За таких умов здійснимо оцінку адекватності функціонування запропонованої моделі та продуктивності ПСМО.

Результати аналітичного моделювання наведені на графіках рис. 7.

З характеру графіків рис. 7 можна зробити наступні загальні підсумки:

- очікувано, що найменша імовірність перебування ПСМО у стані S_m^0 спостерігається при низьких значеннях μ_m і $\bar{k}$, причому, більш критичним тут є низьке значення інтенсивності обслуговування. Провали у характеристиці на графіку (рис. 7, а) при низьких значеннях μ_m обґрунтовані виконанням умови (3), причому навіть при великому значенні $\bar{k}$ (коли групова інтенсивність зростатиме), своєчасного обслуговування не буде здійснюватися через брак вільних каналів ПСМО; відповідно черга матиме властивість зростання, і без додаткового залучення ресурсів ПСМО буде працювати нестабільно;

- імовірність постановки заявки у чергу дещо зростає при низькому числі каналів обслуговування (тобто великих значеннях $\bar{k}$) і порівняно невеликій інтенсивності обслуговування. Можна очікувати, що при невеликих значеннях $\bar{k}$ (відповідно великій кількості каналів обслуговування), вхідні заявки не будуть отримувати суттєвої затримки у обслуговуванні. Проте, можливо потребуватиметься введення

пріоритетності для “складних” термінових заявок (де є об’єктивна необхідність великого значення $\bar{k}$);

- найменший простий каналів ПСМО (рис. 7, в) спостерігається при $\bar{k} = 1 \dots 2$. Тут зауважимо, що хоча показник простою ПСМО певною мірою характеризує ефективність випробувального підрозділу на підготовчому етапі випробувань, але не є критичним з точки зору оцінки загальної ефективності підрозділу, так як фахівці, що зайняті роботами підготовчого етапу, на практиці не відриваються від іншого роду робіт. Інша ситуація буде спостерігатися під час етапу практичних випробувань, коли виконання фахівцями інших робіт фактично неможливо;

- максимальна завантаженість ПСМО відбувається при низьких значеннях $\bar{k}$ (і відповідно великій кількості каналів), але така завантаженість сприятиме низькій середній кількості заявок у черзі на обслуговування (рис. 7, д). Найгірша ситуація з довжиною черги спостерігається при перевищенні медіанного значення $\bar{k}$, що пояснюється незадіяними ресурсами фахівців при формуванні каналів обслуговування.

Висновки

Запропонована у статті модель підсистеми СМО випробувального етапу є найнижчою ланкою СМО випробувальної організації. Модель ґрунтується на відомих аналітичних співвідношеннях продуктивності для багатоканальних СМО з необмеженою чергою. Введене авторами поняття математичного сподівання задіяних фахівців на канал СМО дозволяє врахувати різну кількість фахівців у випробувальних бригадах і уникнути при цьому зайвого ускладнення моделі.

Представлення моделі у такому форматі ще не дає можливості одержати конкретні практичні розрахунки, які дозволять визначити оптимальний план застосування випробувального підрозділу. Для цього необхідно агрегування моделей ПСМО у загальну структуру випробувальної установи та додаткова статистична обробка даних щодо параметрів розподілу вхідного потоку заявок на випробування по випробувальних підрозділах. Проте, дослідження поведінки моделі при деяких припущеннях дозволило зробити загальні висновки щодо формування випробувальних бригад: певного обмеження у кількості фахівців, які обслуговують одну заявку та, звісно, пошуку шляхів збільшення їх продуктивності. Збільшення продуктивності фахівців можливо за рахунок автоматизації основних виробничих процесів підготовчого етапу: розробка програми, методик випробування, інших планових та організаційних документів, що визначають термін підготовки зразка до випробувань.

Рис. 7. Графіки стану ПСМО при варіюванні параметрами $\bar{k}$ і μ_m :

а – імовірність знаходження ПСМО у стані S_m^0 ; б – стаціонарна імовірність відмови заявці в негайному обслуговуванні – P_{vidm} ; в – коефіцієнт простою – P_0 ; г – коефіцієнт завантаження ПСМО – η_m ;

д – середня кількість заявок у черзі на обслуговування – N_m^q

Джерело: розроблено авторами.

Така автоматизація можлива при використанні автоматизованої системи інформаційного супроводження випробувань, загальна концепція якої викладена, наприклад, у [23], а використання матема-

тичного апарату СМО випробувальної установи у складі автоматизованої системи дозволить оперативно будувати оптимальні плани застосування ресурсів.

Список літератури

1. Kleinrock L. Queueing systems. Volume I: theory. New York : John Wiley & Sons, 1975.
2. Allen A. Probability, Statistics and Queueing Theory with Compute Science Applications. Academic Press Inc., Second Edition. 1990.
3. Kleinrock L., Gail R. Queueing systems : problems and solutions. New York: A Wiley-Interscience publication, 1996.
4. ДСТУ 3021-95. Випробування і контроль якості продукції. Терміни та визначення. Київ, 1995. 71 с.
5. Про затвердження Порядку розроблення, освоєння та випуску нових видів продукції оборонного призначення, а

також припинення випуску існуючих видів такої продукції : Постанова Кабінету Міністрів України від 03.03.2021 року № 234. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/234-2021-%D0%BF#Text>.

6. Про затвердження Порядку проведення випробувань зразків озброєння та військової техніки : Постанова Кабінету Міністрів України від 17.02.2021 р. № 159. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/159-2021-%D0%BF#Text>.

7. Хартман К., Лецкий Э., Шеффер В. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов. Москва : Мир, 1977. 541 с.

8. Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке: Методы планирования эксперимента. Москва : Мир, 1981. 520 с.

9. Дмитриев А. К., Марков В. М., Городецкий В. И. Элементы теории испытаний и контроля технических систем. Ленинград : Энергия, 1978. 192 с.

10. Демидов Б.А. Теория и методы военно-научных исследований вооружения и военной техники. Харьков : ВИР-ТА ПВО, 1990. 558 с.

11. Основы военно-технических исследований. Теория и приложения: монография : в 10 т. Т. 9. Прикладные аспекты испытаний и теоретико-экспериментальных исследований вооружения и военной техники / Чепков И. Б. и др. / под ред. С. В. Лапицкого. Киев : Издательский дом Дмитрия Бурого, 2015. 504 с.

12. Чепков І. Б. Деякі проблеми формування державної військово-технічної та оборонно-промислової політики України на сучасному етапі. *Наука і оборона*. 2017. № 3/4. С. 45-53. <https://doi.org/10.33099/2618-1614-2017-1-3/4-45-53>.

13. Смерницький Д. В., Будзинський М. П., Діких О. В., Кисіль М. В., Гусак О. В., Приходько В. І. Аспекти проведення державних та визначально-відомчих випробувань спеціалізованих броньованих автомобілів. *Сучасна спеціальна техніка*. 2017. № 4. С. 97-106. URL: http://elar.naiu.kiev.ua/bitstream/123456789/6647/1/SST-2017-3_p113-123.pdf.

14. Ланецький Б. М., Лук'ячук В. В. Проблемні питання організації та планування випробувань складних технічних систем. *Системи обробки інформації*. 2009. № 4(78). С. 93-96.

15. Корнієнко І. В., Корнієнко С. П., Походенко О. М., Казначей С. М., Руденко О. В. Графічне представлення моделі функціонування випробувальної організації. *Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки*. Чернігів : ДНДІ ВС ОБТ, 2019. Вип. № 2. С. 91-98.

16. Saaty T. L. Stochastic network flows: advances in networks of queues. *Congestion Theory*. Chapel Hill : University of North Carolina, 1964. P. 86-107.

17. Матвеев В. Ф., Ушаков В. Г. Системы массового обслуживания. Москва : Изд-во МГУ, 1984. 240 с.

18. Казачинский В. З., Левитский Г. Е. Математические методы решения военно-специальных задач. Киев : ВА ВПВО, 1980. 292 с.

19. Li L., Liu F., Long G., Zhao H., Mei Y. Performance Analysis and Optimal Allocation of Layered Defense M/M/N Queueing Systems. *Mathematical Problems in Engineering*. 2016. P. 1-21. <https://doi.org/10.1155/2016/5915918>.

20. Корнієнко І. В., Корнієнко С. П., Дмитрієв В. А., Павленко А. Г., Камак Д. О. Формування параметрів вхідного потоку вимог на випробування озброєння і військової техніки. *Озброєння та військова техніка*. 2020. Вип. № 3 (27). С. 95-102. [https://doi.org/10.34169/2414-0651.2020.3\(27\).95-102](https://doi.org/10.34169/2414-0651.2020.3(27).95-102).

21. Kornienko I., Kornienko S., Dmytriiev V., Pavlenko A., Kamak D. Investigation of the Model of Testing for Weapons and Military Equipment. *Mathematical Modeling and Simulation of Systems (MODS'2020)*. MODS 2020. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2021. Vol 1265. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58124-4_30.

22. Ложковский А. Г. Теория массового обслуживания в телекоммуникациях. Одесса : ОНАС им. А. С. Попова, 2012. 112 с.

23. Корнієнко І. В., Корнієнко С. П., Камак Д. О., Казначей С. М., Жирна О. В. Щодо можливих функціональних компонент інформаційної системи супроводження випробувань ОБТ ЗСУ. *Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки*. Чернігів : ДНДІ ВС ОБТ, 2020. Вип. № 4(6). С. 52-61.

Надійшла до редколегії 27.09.2021

Схвалена до друку 16.11.2021

Відомості про авторів:

Корнієнко Ігор Валентинович

кандидат технічних наук доцент
завідувач кафедри
Національного університету "Чернігівська політехніка",
Чернігів, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-9105-0780>

Корнієнко Світлана Петрівна

кандидат технічних наук доцент
доцент кафедри
Національного університету "Чернігівська політехніка",
Чернігів, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-9162-1229>

Дмитрієв Володимир Анатолійович

доктор технічних наук старший науковий співробітник
заступник начальника інституту з наукової роботи
Державного науково-дослідного інституту випробувань
і сертифікації озброєння та військової техніки,
Чернігів, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-0792-6397>

Information about the authors:

Ihor Kornienko

PhD in Engineering Associate Professor
Head of Department
of Chernihiv Polytechnic National University,
Chernihiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-9105-0780>

Svitlana Kornienko

PhD in Engineering Associate Professor
Associate Professor
of Chernihiv Polytechnic National University,
Chernihiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-9162-1229>

Volodymyr Dmytriiev

Doctor of Engineering Science Senior Researcher
Deputy Head of Institute in Research Work
of State Scientific Research Institute of Armament
and Military Equipment Testing and Certification,
Chernihiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-0792-6397>

Павленко Анатолій Григорович

кандидат технічних наук
начальник науково-організаційного відділу
Державного науково-дослідного інституту випробувань
і сертифікації озброєння та військової техніки,
Чернігів, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-6341-8381>

Камак Дмитро Олександрович

начальник науково-дослідного відділу
Державного науково-дослідного інституту випробувань
і сертифікації озброєння та військової техніки,
Чернігів, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-0348-5456>

Anatolii Pavlenko

PhD in Engineering
Head of the Scientific Organizational Department
of State Scientific Research Institute of Armament
and Military Equipment Testing and Certification,
Chernihiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-6341-8381>

Dmytro Kamak

Head of the Scientific-Research Department
of State Scientific Research Institute of Armament
and Military Equipment Testing and Certification,
Chernihiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-0348-5456>

**РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ПОДГОТОВИТЕЛЬНОГО ЭТАПА ИСПЫТАНИЙ ВВТ:
МОДЕЛЬ ПРОДУКТИВНОСТИ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОДРАЗДЕЛЕНИЯ**

И.В. Корниенко, С.П. Корниенко, В.А. Дмитриев, А.Г. Павленко, Д.А. Камак

Обеспечение подразделений Вооруженных Сил Украины новейшими разработками вооружения и военной техники способствует увеличению военного потенциала и обороноспособности государства в целом. Одним из важных и обязательных этапов при создании современных образцов военно-технических изделий является проведение их всеобъемлющих испытаний. Требования, предъявляемые к процессу испытаний, формулируются в терминах качества исследований и их своевременности. С учетом уникальности учреждения, проводящего испытания, актуальным является проблема оптимизации всех испытательных процессов и их направления на обеспечение максимальной продуктивности. В статье рассмотрены вопросы математического моделирования процесса испытаний, а именно – обеспечение необходимой пропускной способности подготовительного этапа испытаний. Выполнена детализация ранее рассматриваемой общей схемы процессов испытаний, представленных в виде графической модели системы массового обслуживания. Обособлены временные интервалы подготовительной стадии и стадии практических испытаний, которые, в свою очередь, образуют две последовательные системы массового обслуживания. Выполнена декомпозиция системы массового обслуживания подготовительной стадии до уровня отдельного испытательного подразделения, которое, в свою очередь, представляется подсистемой системы массового обслуживания. Обосновывается использование значения математического ожидания числа специалистов испытательной бригады для формирования количества каналов аналитической модели подсистемы массового обслуживания. На основе типовых аналитических моделей систем массового обслуживания формируются показатели качества функционирования испытательного подразделения. Используя реальные статистические характеристики входного потока образцов для испытаний, осуществляется аналитическое моделирование подготовительного этапа на уровне испытательного подразделения. При этом исследуется адекватность модели и ее поведение при варьировании параметрами математического ожидания количества специалистов в испытательных бригадах и интенсивности обслуживания одним специалистом. Результаты моделирования представлены в графическом виде, даются общие выводы и рекомендации.

Ключевые слова: испытания, вооружение и военная техника, моделирование, система массового обслуживания.

**DEVELOPMENT OF A MODEL OF THE PREPARATORY PHASE OF TEST TESTS:
A MODEL OF PRODUCTIVITY OF THE TEST DIVISION**

I. Korniienko, S. Korniienko, V. Dmytriiev, A. Pavlenko, D. Kamak

Providing units of the Armed Forces of Ukraine with the latest developments in armaments and military equipment will increase the military potential and defense capabilities of the state as a whole. One of the important and obligatory stages in the creation of modern models of military-technical products is to conduct their comprehensive testing. Requirements for the testing process are formulated in terms of research quality and timeliness. Given the uniqueness of the institution that conducts testing, the problem of optimizing all testing processes and their focus on ensuring maximum productivity is relevant. The article considers the issues of mathematical modeling of test processes, namely the provision of the required bandwidth of the preparatory stage of tests. The general scheme of test processes, presented in the form of a graphical model of the queuing system, is detailed. The time intervals of the preparatory stage and the stage of practical testing are separated, which in turn form two consecutive queuing systems. The decomposition of the queuing system of the preparatory stage to the level of a separate test division is performed, which in turn is a subsystem of the queuing system. The use of the value of mathematical expectation of the number of specialists of the test team for the formation of the number of channels of the analytical model of the queuing subsystem is substantiated. On the basis of typical analytical models of queuing systems, indicators of the quality of operation of the test division are formed. Using the defined real statistical characteristics of the input stream of test samples, analytical modeling of the preparatory stage at the level of the test division is carried out. The adequacy of the model and its behavior when varying the parameters of the mathematical expectation of the number of specialists in the test teams and the intensity of service by one specialist are investigated. The simulation results are presented graphically and general results and recommendations are made.

Keywords: tests, armament and military equipment, modeling, queuing system.