

Мусорін О.О.

РОЗРОБКА ВИМОГ ДО МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ТА РЕМОНТУ СУДНОВИХ КОМПЛЕКСІВ

У статті розроблені вимоги до математичної моделі процесу технічної експлуатації об'єктів суднових комплексів, обрано клас моделі та метод моделювання. Це дозволило розробити формалізований опис процесу, що досліджується, обґрунтувати форму показників його ефективності та критерію оптимальності, здійснити математичну постановку часткових завдань дослідження.

Необхідність використання математичної моделі досліджуваного процесу, в якій взаємопов'язані параметри, показники та критерії, виходить з принципу системного підходу при оцінці ефективності складних систем [1-3].

Вибір математичного апарату аналізу явища, що досліджується, базується на попередньому досвіді і даних, що отримані як результат вивчення реальних об'єктів. Розглядаючи у загальному плані будь-яке явище, що досліджується, може бути обрана одна з двох математичних моделей – детермінована або стохастична [4]. Детермінована модель обирається у тих випадках, в яких можна точно вказати причини, під впливом яких трапляються зміни досліджуємого процесу, і у випадку відомих вхідних впливів, можна з будь-яким ступенем точності розрахувати вихідний результат.

В зв'язку з тим, що процес технічного обслуговування і ремонту об'єктів СК класифікується як стохастичний [5,6], точно врахувати всі випадкові фактори, що впливають на нього практично неможливо, то для адекватного опису процесу ТО і Р повинна бути побудована стохастична модель.

Як відомо, математичні моделі, що дозволяють кількісно описати процес функціонування об'єктів експлуатації, оснований на апріорних відомостях про можливі стани процесу технічної експлуатації (ПТЕ) та умовах переходу з одного стану в інший, а також на статистичних даних, що отримані протягом експлуатації однотипних технічних систем. У зв'язку з цим, спираючись на аналіз особливостей ПТЕ суден і мету дослідження, сформулюємо вимоги до математичної моделі, що розробляється:

1. Вимога побудови моделі процесу: перехід об'єкту СК з одного стану ПТЕ до іншого відбувається за часом, тому математична модель процесу технічної експлуатації СК судна повинна представляти собою модель процесу з відомим статистичним описом.

2. Вимога щодо обмежень: для забезпечення можливості порівняльної техніко-економічної оцінки різних варіантів організації процесу відновлення СК та впливу на його процес технічної експлуатації апаратно-програмних комплексів контролю та діагностування технічного стану СК за результатами моделювання в моделі не повинно бути жорстких обмежень на простір станів ПТЕ та функції розподілу часу (ФРЧ) перебування в станах процесу технічної експлуатації.

3. Вимога простоти: забезпечити простоту опису ПТЕ СК в моделі, що дозволить вирішити поставлену задачу з достатньою точністю, а також забезпечити простоту створення самої моделі. Ця вимога ґрунтується, з одного боку, необхідністю отримання бажаного результату, а з іншого – практичними обмеженнями на обсяг інформації, що

необхідний для визначення шуканих характеристик досліджуємого процесу.

4. Вимога наочності: забезпечити наочність представлення процесу, що досліджується, відновлення в моделі, що розробляється, для її легкого сприйняття.

5. Вимога адаптивності: забезпечити можливість оперативного уточнення моделі при накопиченні поточної інформації про хід реального ПТЕ, що надходить.

6. Вимога контрольованості результатів: забезпечити реальну можливість простежити причинно-наслідкові зв'язки параметрів в моделі ПТЕ протягом моделювання.

7. Вимога малої трудомісткості обчислень: забезпечити ефективні алгоритми оцінювання шуканих показників техніко-економічної ефективності ПТЕ об'єктів СК з метою отримання доступних для огляду результатів моделювання.

Як видно з розроблених вимог до математичної моделі ПТЕ СК судна, вимоги 1 – 3 визначаються класом обраної стохастичної моделі, вимоги 5 – 7 визначаються обраним методом моделювання, при цьому вимога простоти моделі 4 є загальною. На підставі приведених вище вимог до математичної моделі оберемо клас стохастичної моделі та метод моделювання.

Вибір класу моделі і методу моделювання.

Обґрунтування класу моделі. Стохастичні моделі зазвичай класифікуються як випадкові процеси і можуть являти собою процеси з дискретними станами (множина станів кінцева або підраховується) та з безперервною множиною станів (множина станів ставиться у взаємно-однозначну відповідність множині точок числового інтервалу), з дискретним часом (випадкові послідовності) та з безперервним часом [3]. На цей час розроблена велика кількість стохастичних моделей, що застосовують для опису функціонування складних технічних систем, основними класами яких є [4-6]: булеві, лінійні, гаусівські, автоматні, агрегатні, марковські, напівмарковські, регенеруючі, багатокомпонентні, моделі у вигляді систем масового обслуговування.

У рамках булевої імовірнісної моделі припускається, що функціонування технічної системи можна представити у вигляді послідовно-паралельної схеми з входом та виходом, а також заданою кількістю проміжних вершин (контактів), замкнутість яких і інтерпретується як поява події, що моделюється. Зрозуміло, що така проста інтерпретація функціонування технічних систем не дозволяє використовувати булеві імовірнісні для адекватного кількісного опису процесу технічної експлуатації (ПТЕ) об'єктів СК. Даний клас моделей, як правило, використовується для спрощеного імовірнісного розрахунку надійності технічних систем, що досліджуються [7]. Таким чином, булева імовірнісна модель задовольняє тільки вимогам 3,4.

Складність застосування лінійних [1,2] та гаусовських [3] імовірнісних моделей для опису процесу технічної експлуатації об'єктів СК заключається в важкості обґрунтування лінійної залежності між параметрами, що описують ПТЕ та показниками його ефективності, а також в важкості знаходження оператора лінійного перетворення (передаточної функції). Очевидно, що застосування даних класів моделей дозволяє задовольнити тільки вимогам 1 та 3.

Таким чином, за допомогою булевих, лінійних та гаусовських імовірнісних моделей процес функціонування адекватно описується лише для обмеженого кола технічних систем, що підпорядковані жорстким закономірностям, що дозволяють прийняти відповідні даним моделям припущення щодо імовірнісного характеру випадкових процесів, що розглядається.

Автоматні та агрегатні імовірнісні моделі ґрунтуються на представленні технічних систем, що моделюються у вигляді кінцевих автоматів (агрегатів) [8,9]. Функціонування реальної технічної системи в межах автоматної (агрегатної) моделі описується операторами переходів та операторами виходів, а також схемами поєднання, що характеризуються сукупністю наборів контактів та операторів поєднання. Імовірнісні автомати (агрегати), як

правило, використовуються для оцінювання складних технічних систем з ненадійними елементами, систем з змінною за часом випадковим чином структурою, а також систем, структура і стан яких в деякі моменти часу достовірно невідомі та не можуть бути описані лише термінами теорії імовірностей [9]. Як будь-яка універсальна система, агрегативний підхід приводить до перевантаження моделі, що є суттєвим недоліком для системи, що складається з сотень елементів, якою є система експлуатації парку судна. Крім того, модель, що побудована як агрегативна система, втрачає наочність [9], що може бути суттєвою перешкодою на шляху її активного використання. Таким чином застосування даних класів моделей дозволяє задовольнити вимогам 1, 2.

Дослідження показало [5,7], що для реальних стохастичних систем, що змінюють свої стани стрибком, характерна наявність кінцевої кількості можливих переходів, що визначаються кінцевою кількістю випадкових факторів змінюючи даний стан системи. Кожний з таких факторів характеризується визначеним випадковим часом впливу, що залежить, як правило, від даного стану системи. В зв'язку з цим серед стохастичних моделей систем особливо виділяються марковські, напівмарковські та регенеруючі системи [3].

Процес функціонування досліджуємої технічної системи S в марковській моделі описується марковським процесом $S(t)$, що може бути представлений у вигляді випадкового процесу з дискретними або безперервними станами, з дискретним або безперервним часом. На практиці для опису процесу функціонування реальних технічних систем, як правило, використовують марковський процес (МП) з дискретним ФПС та безперервним часом. В цьому випадку припускається, що модельована система S може знаходитись в кінцевій множині станів $E = \{e_1, e_2, \dots, e_N\}$, де N – кількість усіх можливих станів. Процес еволюції системи S здійснюється зміною її станів $S(T) = S_n$ за рахунок переходу з одного стану e_i до іншого e_j ($i, j \in E$). Марковський процес визначається марковською властивістю, що створюється незалежністю імовірностей переходів системи з даного стану від всієї попередньої еволюції системи до влучення в цей стан та незалежностей розподілів тривалості перебування в станах Θ_n від всієї попередньої даному стану еволюції системи. Однак сильним обмежувальним припущенням у марковській моделі є припущення про показовий розподіл тривалості Θ перебування системи, що моделюється, в будь-якому модельному стані $E = \{e_1, e_2, \dots, e_N\}$.

Богаточисельні дослідження показали [1-4], що формальний опис більшості технічних систем такий, що знання будь-якої попередньої історії цієї системи суттєво не впливає на її стан в майбутньому, у зв'язку з чим клас марковських систем знайшов широке застосування для математичного опису процесів функціонування різноманітних технічних систем. Це також обумовлено високою наочністю марковської моделі, необхідністю прийняття порівняно невеликої кількості припущень, простотою математичного апарату аналізу.

Однак, умова експоненціальності законів розподілу часу перебування у модельних станах, що забезпечує властивість відсутності післядій марковського процесу, у практичних завданнях технічної експлуатації, що передбачає виконання різних операцій з ТО і Р, виконується рідко. В першу чергу, це пов'язано з наявністю у процесі експлуатації станів планових перевірок та контролю, різних видів технічного обслуговування та ін. з регламентованим часом, а також непуасонівських потоків, що переводять систему з стану в стан [4-6]. Таким чином, марковська модель задовольняє вимогам 1, 3, 4, але не задовольняє вимозі 2, що не дозволяє адекватно описати реальний процес технічної експлуатації об'єктів СК у межах марковської імовірнісної моделі.

Напівмарковська імовірнісна модель характеризується тим, що вона позбавлена від обмеження на закон розподілу часу перебування у модельних станах. В зв'язку з цим клас

напівмарковських систем в більшому ступені підходить для опису ПТЕ реальних складних технічних систем, в яких зміна станів відбувається під дією випадкових факторів, що доступні для спостереження і математичного опису. НМС забезпечені достатньою мірою ефективним математичним апаратом аналізу і являють собою безпосереднє узагальнення ланцюгів Маркова на випадок довільних законів розподілу часу перебування в станах [8]. Поряд с тим напівмарковські моделі вимагають наявності доволі значного статистичного матеріалу для адекватного завдання законів розподілу часу перебування в модельних станах, що не завжди можливо і призводить до значних похибок внаслідок суб'єктивних припущень дослідника щодо ФРЧ перебування в станах [1,2].

В переважній кількості задач прикладного характеру використання марківської апроксимації призводить до отримання рішень з похибкою, що знаходиться в межах точності вихідних даних. Моделювання ПТЕ складних технічних систем з використанням процесів марковського (напівмарковського) відновлення показало, що в більшості випадків ця похибка обмежена 3...5% [4]. Таким чином клас напівмарковських моделей задовольняє висунутим вимогам 1, 2, 4 за рахунок вимог 3, 6.

Процес технічної експлуатації парку як річкових так і морських суден являє собою складний взаємопов'язаний стохастичний процес функціонування окремих об'єктів СК у складі судна. Така система може бути описана класами регенеруючих, багатокомпонентних стохастичних систем і системами масового обслуговування [5].

Клас багатокомпонентних систем виділяється з широкого кола стохастичних систем тим, що еволюція такої системи задається напівмарковською моделлю, яка досить адекватно її описує, і поряд з тим достатньо досяжна та ефективна в аналізі функціонування [5]. В цьому випадку припускається, що система, яка досліджується, складається з кінцевої кількості об'єктів, кожен з яких l^k , $k = \overline{1, L}$ може знаходитись в кінцевій кількості N_k , $k = \overline{1, N_k}$ можливих станів. Функціонування кожного об'єкта l^k описується напівмарковським процесом $(l^k_n, \Theta^k_n; n \geq 0)$ в кінцевому фазовому просторі станів (ФПС) $E^k = \overline{1, N}$. При цьому припускається, що кожний об'єкт функціонує незалежно від інших об'єктів системи. Багатокомпонентна система задається кінцевою сукупністю незалежних напівмарковських (НМ) відновлень $(l^k_n, \Theta^k_n; n \geq 0)$ з кінцевим ФПС $E^k = \overline{1, N}$.

Даний клас систем має ефективний апарат аналізу [5,7], що при використанні НМ моделі процесу технічної експлуатації одиничного об'єкту СК як елемента парку суден дозволяє порівняно легко оцінити шукані характеристики парку однотипних об'єктів СК. Клас багатокомпонентних систем задовольняє вимогам 1, 3, але не зовсім відповідає вимозі 2 та не задовольняє вимозі 4.

Від припущення щодо незалежності функціонування окремих об'єктів позбавлені моделі, що побудовані у вигляді систем масового обслуговування (СМО) [76,79,87,107]. Функціонування складної системи, що описується СМО, представляється у вигляді деякої сукупності каналів обслуговування з визначеним механізмом обслуговування, на які поступає потік заявок на обслуговування з заданою дисципліною черги. Характерною задачею теорії масового обслуговування є встановлення залежності між характером потоку заявок, продуктивністю окремих каналів та ефективністю обслуговування.

В цей час отримані аналітичні рішення вказаних характеристик для СМО з простішою дисципліною черги та елементарною структурою, що як правило, характеризується наявністю марковської властивості досліджуємого процесу [3,4]. Таким чином, клас стохастичних моделей у вигляді СМО задовольняє вимогам 1,4 але не в повній мірі задовольняє вимогам 2, 3.

Іншим широким класом моделей є моделі, що використовують регенеруючі випадкові процеси [3,4]. Ці моделі ґрунтуються на припущенні, що досліджуємый технічний об'єкт

протягом експлуатації з імовірністю $P(\xi)=1$ за кінцевий час ξ (тривалість циклу) потрапляє в деякий стан (момент регенерації), в якому вся попередня історія перестає впливати на його подальшу еволюцію. Функціонування технічного об'єкта описується регенеруючим процесом $Y(t)$ з кінцевою множиною $\{\theta_i\}$ циклів регенерації, кожен з яких складається з кінцевої множини фаз w_n (станів) в кінцевому ФПС $E^k = \overline{1, N}$, причому не обов'язково, щоб процес $Y(t)$ у кожному i -му циклі проходив через усі фази. Циклічний характер таких випадкових процесів полегшує дослідження їх асимптотичних властивостей, що співпадає з метою даного дослідження. Крім того, на відміну від марковських (напівмарковських) моделей не висувається жорстких обмежень на закони розподілу часу перебування в модельних станах. Але представлення ПТЕ у вигляді регенеруючого процесу передбачає, що потік відновлень є рекурентним.

Даний клас моделей має ефективний апарат аналізу [1-7], що при представленні процесу технічної експлуатації складної технічної системи у вигляді регенеруючого дозволяє легко визначити стаціонарні характеристики для парку однотипних об'єктів СК. Клас моделей регенеруючих процесів задовольняє вимогам 1 – 4 і не задовольняє вимогам 5, 7.

Результати проведеного аналізу стохастичних моделей функціонування об'єктів експлуатації, що застосовуються для створення математичних моделей ПТЕ складних технічних систем, дозволяють обрати клас моделей, що використовують регенеруючі процеси відновлення. Використання моделей даного типу дозволяє успішно вирішити задачу вибору раціональних стратегій ТО і Р, а в ряді випадків може бути вирішена задача оптимізації [1-7].

Обґрунтування методу моделювання. Визначення імовірнісних характеристик стохастичних моделей може здійснюватись різними методами моделювання випадкових процесів. Розрізняють аналітичний, імітаційний та комбінований методи [1-9].

Аналітичні моделі, за звичай, використовуються у тих випадках, коли кількість параметрів, що характеризують досліджуєми процес, не дуже велика, або залежності між ними не дуже складні [2]. Вони дозволяють за допомогою алгебраїчних, диференціальних, різницевих та інших видів рівнянь встановити формульні залежності між основними факторами, що визначають досліджуєми процес, та показниками його ефективності. Вони також зручні й тим, що для їх побудови та дослідження можна застосовувати різноманітні математичні методи та прийоми.

Методи аналітико-стохастичного аналізу передбачають складання та рішення систем диференціальних рівнянь безпосередньо для імовірностей можливих станів ПТЕ [3], що дозволяє задовольнити вимогам системності та достовірності, внаслідок забезпечення можливості отримання законів розподілу шуканих характеристик моделі, а значення шуканих показників ефективності за результатами розрахунків можуть бути отримані з одиничним значенням довірчої імовірності і нульовим – довірчого інтервалу. Крім того, даний метод забезпечує контрольованість результатів та малу трудомісткість обчислень.

При теоретико-імовірнісному методі диференціальні рівняння складаються з урахуванням стану кожного об'єкта експлуатації та його характеристик [4], що для технічних систем великого масштабу (парку суден або його комплектуючих) призводить до різкого збільшення кількості рівнянь. Як наслідок цього модель втрачає наочність та не задовольняє вимогам щодо простоти створення та контрольованості результатів моделювання.

Загальним недоліком аналого-стохастичного та теоретико-імовірнісного методів моделювання є відсутність можливості розробки на їх основі універсальної адаптивної моделі ПТЕ об'єктів СК, внаслідок того, що будь-яке внесення змін у склад простору станів ПТЕ або функцій розподілу часу (ФРЧ) перебування у модельних станах призводить до

необхідності знов виводити всі передбачені аналітичні залежності для оцінки показників ефективності. Тобто фактично створювати нову модель.

Метод динаміки середніх дозволяє при великій кількості можливих станів досліджуємої складної технічної системи (функціонування окремих елементів описується процесами відновлення у кінцевому ФПС) оцінити середні характеристики функціонування всієї системи [5]. З його допомогою можливо обійти обчислювальні складнощі, що пов'язані з сумісним розв'язанням великої кількості диференціальних або алгебраїчних рівнянь для знаходження імовірностей станів складної системи, що досліджується. Сутність методу динаміки середніх заключається в тому, що протягом процесу математичного аналізу багатокomпонентної складної системи розглядаються не стани системи в цілому, а окремого її елементу. Це ґрунтується на припущенні про незалежність потоків подій, що переводять елемент системи з стану в стан, від чисельності елементів в даному та інших станах. Очевидно, що дане припущення може бути виконано, якщо окремі елементи системи функціонують незалежно один від іншого, або параметри ФРЧ перебування окремого елемента системи у довільному модельному стані до переходу в суміжний з ним задані з урахуванням взаємодії (залежності) процесів функціонування решти елементів складної системи. Крім того, дане припущення може бути послаблене за рахунок використання принципу квазірегулярності, а також за рахунок урахування поповнення загальної чисельності станів [6]. Таким чином, основним недоліком методу динаміки середніх є невідповідність вимогам системності.

Поряд з аналітичними імітаційні методи є найбільш розповсюдженими засобами теорії управління та дослідження операцій щодо управління ефективністю складних систем [7]. Імітаційне моделювання заключається в представленні динамічної поведінки досліджуємої системи шляхом просування її від одного стану до іншого у відповідності з чітко визначеними операційними правилами. При цьому зміни станів системи відбуваються або безперервно, або у дискретні моменти часу, тобто основною концепцією імітації системи, що розглядається, є відображення зміни її станів протягом часу. Важливою перевагою імітаційного моделювання є можливість фіксації проміжних значень різних показників протягом імітації подібно до того, як це відбувається протягом експлуатації реальної системи. Імітаційні моделі, як правило, використовуються для проектування, аналізу та оцінювання функціонування складних систем [8]. Імітаційне моделювання базується на концепції ітеративної побудови моделі, в ході якого модель змінюється шляхом доповнення новими або виключення деяких її елементів і (або) взаємозв'язків між ними. При цьому припускається, що систему можна описати в термінах, що зрозумілі обчислювальній системі.

Детерміновані імітаційні (детальні) моделі основані на розробці детермінованої "копії" процесу, що досліджується [9]. Але в зв'язку з тим, що процес технічної експлуатації об'єктів СК класифікується як стохастичний, вони не можуть бути застосовані для створення математичної моделі ПТЕ об'єктів СК.

В статистичних моделях порівняно просто враховуються дискретні, безперервні, логічні параметри, їх нелінійні зв'язки, а також різноманітні випадкові фактори та впливи на процес технічної експлуатації [1-5], що дозволяє задовольняти вимогам адаптивності, універсальності та простоти створення моделі, що розробляється. Статистичний метод моделювання передбачає багатократний прогін імітаційної моделі для набору статистики, що дозволяє задовольнити також вимогам достовірності та системності результатів моделювання. До останнього часу основним недоліком статистичних моделей вважалась необхідність великих витрат часу на проведення імітаційних експериментів (велика трудомісткість обчислень) для отримання достовірних характеристик досліджуемого процесу [4-6]. Але поява в останній час швидкодіючих персональних ЕОМ зробило цей недолік несуттєвим.

Загальним недоліком імітаційних моделей є відсутність контролю результатів внаслідок того, що імітаційні моделі побудовані за принципом “чорної скрині” [101].

Комбіновані методи моделювання об’єднують переваги статистичного та аналітичного моделювання.

Аналітико-статистичні моделі представляють собою сукупність методів прискореного моделювання, що засновані на сполученні аналітичних та статистичних методів.

Аналітико-статистичні методи основані на методі малого параметру [9]: серед вихідних характеристик процесу експлуатації, що моделюється, визначається та, яку можна обрати у якості малого параметра ε . Після чого використовуючи різні аналітичні методи, шукані характеристики досліджуємого процесу (показники ефективності) представляються у вигляді ряду за степенями ε , при цьому коефіцієнти цього ряду інтерпретуються як математичні очікування функціоналів від деяких допоміжних випадкових процесів та визначаються за допомогою методу статистичного моделювання. В основному даний метод розвивався для оцінювання безвідмовності високонадійних систем [9]. Очевидно, що при розробці математичних моделей ПТЕ об’єктів СК ці моделі не задовольняють вимогам адаптивності та універсальності, не повною мірою задовольняють вимогам контрольованості результатів та простоти створення.

Висновок. Результати проведеного аналізу методів, що застосовуються для моделювання процесів експлуатації СТС, з урахуванням обраних класів стохастичних математичних моделей, дозволяють обрати методи аналітичного моделювання та динаміки середніх.

ЛІТЕРАТУРА

1. Егоров Г.В. Проектирование судов ограниченных районов плавания на основании теории риска. – СПб.: Судостроение, 2007. – 384 с.
2. Техничко-економические характеристики судов морского флота. РД 31.03.01-90. – М.: В/О «Мортехинформреклама», 1992. – 232 с.
3. Судходство и судостроение (статистика, экономика, цены). ЦНИИ им. Акад. А.Н.Крылова. – Вып. 8(35). – СПб, 2006. – 260 с.
4. Смирнов Н.Н., Ицкович А.А. Обслуживание и ремонт техники по состоянию. – М.: Транспорт, 1987. – 277 с.
5. Волков Л.И. Управление эксплуатацией корабельных комплексов – М.: Высшая школа, 1981. – 368 с.
6. Барзилович Е.Ю. Модели технического обслуживания сложных систем. – М.: Высшая школа, 1982. – 231 с.
7. Навігаційне забезпечення управління рухом суден (навчальний посібник)/ [Богом'я В.І., Давидов В.С., Доронін В.В., Пашков Д.П., Тихонов І.В.].–Вид.1-е.–К.:ДВВП «Компас», 2012. – 336 с.
8. Каштанов В.А. Оптимальные задачи технического обслуживания. – М.: Знание, 1981. – 122 с.
9. Стадник А.И. Выбор метода многокритериальной оптимизации для управления водным транспортным средством// Лавриненко В.Ф., Стадник А.И., Тарохтей В.П. –К.:КДАВТ, «Водний транспорт», 2014. –Вип.3(21).–С.11–14.