

УДК 623.746

О. Л. КОЛОС, кандидат технічних наук, викладач кафедри інженерної техніки факультету підготовки спеціалістів інженерних військ та військ радіаційного, хімічного і біологічного захисту Академії Сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, м. Львів

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ТА РЕМОНТУ МАШИН ІНЖЕНЕРНОГО ОЗБРОЄННЯ В УМОВАХ ЇХ ІНТЕНСИВНОГО ЗАСТОСУВАННЯ

У статті засобами теорії почасового резервування обґрунтовується доцільність використання планових простоїв машин інженерного озброєння для проведення профілактичних робіт технічного обслуговування і поточного ремонту з метою підтримання її надійності на необхідному рівні у випадку інтенсивної їх експлуатації. Для кількісної оцінки впливу процесу організації функціонування системи технічного обслуговування у відповідності до запропонованої моделі системи технічного обслуговування на зміну рівня надійності техніки розроблена математична модель розрахунку коефіцієнта технічного використання машин інженерного озброєння, яка враховує не ідеалізовані, а реальні можливості щодо використання щодобових простоїв техніки як резерву для її технічного обслуговування та ремонту.

Ключові слова: *технічне обслуговування, ремонт машин, інженерне озброєння.*

Постановка проблеми у загальному вигляді. Аналіз процесу експлуатації машин інженерного озброєння (МІО) частин і підрозділів інженерних військ Збройних Сил України у складі міжнародних миротворчих сил [1; 2] свідчить про суттєві відмінності цього процесу порівняно з експлуатацією техніки інженерних військ на території України. Виявлені особливості експлуатації інженерної техніки в ході виконання миротворчих завдань (надзвичайно широкий перелік завдань, значний обсяг призначених невідкладних робіт, жорсткі вимоги щодо строків їх виконання, висока інтенсивність використання техніки у складних природно-географічних умовах, застосування штрафних санкцій у випадках невиходу техніки для виконання робіт з причини непрацездатності) суттєво ускладнюють розв'язання питання забезпечення необхідного рівня надійності техніки миротворчих підрозділів. Це у свою чергу негативно впливає на виконання частинами і підрозділами інженерних військ завдань у ході міжнародних миротворчих операцій і свідчить про актуальність, доцільність та невідкладність удосконалення існуючої системи технічного обслуговування та ремонту (ТО та Р).

Метою статті є розробка математичної моделі функціонування системи технічного обслуговування та ремонту машин інженерного озброєння в умовах їх інтенсивного застосування.

Виклад основного матеріалу дослідження. Одним з перспективних шляхів підвищення ефективності ТО та Р МІО є виявлення в самих об'єктах обслуговування і в процесах їх функціонування резервів часу (почасової надмірності) та врахування і використання останніх при проведенні технічного обслуговування або ремонту МІО безпосередньо під час використання за призначенням чи простою. Це дозволить відчутно підвищити коефіцієнт готовності МІО з почасовою надмірністю K_t і коефіцієнт технічного використання МІО $K_{ТВ}$, які вважаються найбільш інформаційними і доцільними для застосування комплексними показниками надійності об'єктів технічного обслуговування.

Розглянемо дві математичні моделі періодичного ТО зразка інженерного озброєння, що можна умовно віднести до систем неперервного використання. Обидві моделі являють собою систему обслуговування зі щодобово поповнюваним резервом часу, у яких об'єкт обслуговування поданий одним структурним елементом, напрацювання якого на відмову – випадкова величина $t_{i,r}$, закон розподілення якої може бути поданий експоненціальною залежністю $F(t) = 1 - \exp(-\lambda t)$, де λ – інтенсивність від-

мов техніки. У системі передбачено проведення двох видів відновлювальних робіт: періодичного ТО, яке проводиться з періодичністю T_{TO} , і аварійно-профілактичних (поточних) ремонтів. Тривалість проведення ТО – t_{TO} є випадковою величиною з функцією розподілення $\Phi(t) = 1 - \exp(-\theta t)$ та значенням математичного очікування (МОЧ) \bar{t}_{TO} , де θ – інтенсивність проведення ТО. У випадку відмови техніки в системі передбачено виконання поточного ремонту, тривалість якого t_B – випадкова величина з функцією розподілу $F_B(t) = 1 - \exp(-\mu t)$ і кінцевим значенням МОЧ \bar{t}_B та μ – інтенсивності відновлювання техніки. У системі передбачені резерви часу: τ_{D1} – на проведення ТО і τ_D – на проведення поточного ремонту техніки. Величини τ_{D1} і τ_D є випадковими з функціями розподілу $D_1(t) = 1 - \exp(-\gamma_1 t)$; $D(t) = 1 - \exp(-\gamma t)$ і кінцевими значеннями МОЧ \bar{t}_1 і \bar{t} відповідно, де γ_1 і γ – інтенсивності надання резервів часу τ_{D1} і τ_D відповідно.

Перша з моделей, що розглядаються, – ідеалізована і функціонує у суворій відповідності до класичного варіанта теорії почасового резервування. Це означає, що у випадку, коли до визначеного моменту T_{TO} техніка не відмовила, то відразу саме з цього моменту розпочинаються роботи, що входять до складу планового ТО. З цього ж моменту починається також відлік резервного часу, що передбачений на проведення ТО. За умови, що час проведення ТО не перевищує τ_{D1} , тобто $t_{TO} \leq \tau_{D1}$, його відносять до корисного часу функціонування системи, в протилежному випадку – до непрацездатного стану. Крім того, при виникненні відмови техніки миттєво починається проведення її ремонту і також починає спливати резервний час, що передбачений на його проведення. При виконанні умови $t_B \leq \tau_D$ час ремонту МІО відносять до її працездатного стану, в іншому випадку – до непрацездатного.

При побудові другої моделі враховуються реальні можливості щодо використання системою резерву часу, який формується з урахуванням затвердженого плану застосування техніки за призначенням, діючого у військовій частині розпорядку дня та реальних можливостей ремонтного підрозділу щодо негайного початку відновлювальних робіт. Порядок використання часового резерву при проведенні планових ТО для другої моделі прийнятий такий, як і для першої. Тобто наявний резерв часу вступає в дію відразу з моменту планового початку робіт ТО відповідно до встановленої періодичності його проведення. Обґрунтування правомірності такої регламентації почасового резервування обумовлюється від-

повідністю реальних умов функціонування інженерної техніки вихідним теоретичним передумовам. Законність використання часу простою МІО за відсутності планових робіт як резервного часу для проведення ТО не викликає ніяких заперечень. Дійсно, якщо навіть час проведення чергових робіт ТО припадає на період використання МІО за призначенням, то зрозуміло, що можна без будь-яких ускладнень (без зупинення цих робіт) дочекатися наступного періоду простою МІО (завершення терміну використання техніки за призначенням на поточний день) і після цього приступати до виконання необхідних робіт ТО. Запропонована незначна затримка в початку виконання робіт ТО практично не вплине на ефективність його проведення і не позначиться на рівні надійності МІО (навіть при значному відхиленні (на 20 %) в бік збільшення або зменшення від оптимального значення часу періодичності обслуговування коефіцієнт технічного використання $K_{ТВ}$ зменшується порівняно зі своїм максимальним значенням не більше як на декілька відсотків) [3]. Тобто зсув у часі використання резерву часу (початку виконання робіт ТО) не порушує загальних принципів застосування розглянутих теоретичних положень і дозволяє скористатися викладеними вище результатами щодо можливості підвищення надійності МІО шляхом використання часу простою МІО для їх ТО.

Що ж стосується виконання робіт поточного ремонту техніки, то теж передбачається можливість використання резерву часу τ_D . Але для другого варіанта моделі системи ТО в цьому випадку відмова враз зупиняє час використання техніки за призначенням і починається відлік часу, що характеризує непрацездатний стан МІО. При цьому миттєве використання щодобового резерву часу неможливе. Час непрацездатного стану МІО буде тривати аж до моменту завершення визначеного розпорядком дня робочого часу і відсутності черги на виконання ремонтних робіт. Тільки з цього моменту час простою МІО можна розглядати за умовами функціонування другої моделі як резервний час. Якщо відновлення працездатності МІО відбудеться протягом резервного часу τ_D , то цей часовий інтервал, протягом якого відбувалося відновлювання зразка озброєння, будемо відносити до часу знаходження МІО у працездатному стані. При невиконанні умови $t_B \leq \tau_D$, тобто при перевищенні часу ремонту техніки наявного резерву часу, продовжується відлік непрацездатного стану техніки. Аналізуючи ситуацію, яка складається в такому випадку, доходимо висновку, що проміжок часу від відмови до закінчення робочого дня або

від відмови до закінчення ремонту (якщо відновлення об'єкта завершиться до кінця робочого часу) буде збільшувати загальний час непрацездатного стану МІО і негативно впливати на значення комплексного коефіцієнта надійності – коефіцієнта технічного використання (КТВ) даного зразка інженерного озброєння.

Для математичного підтвердження вищевикладеного представимо процес функціонування розглянутих моделей системи ТО шляхом застосування математичного апарату напівмарковських процесів (НМП) і з їх допомогою розрахуємо значення показників надійності МІО в процесі їх експлуатації у відповідності до умов функціонування цих моделей. Порівняння результатів проведених розрахунків зможе дати кількісну оцінку доцільності використання запропонованої (другої) моделі функціонування системи ТО та Р МІО як більш адекватної реальним умовам функціонування відносно першої моделі – ідеалізованого варіанта системи ТО та Р МІО з почасовою надмірністю. Математичний апарат НМП дозволяє здійснити визначення показників надійності через визначення часу перебування процесу функціонування системи у фіксованій підмножині станів. Відповідно до методики застосування НМП [3] процес функціонування системи ТО та Р МІО може бути описаний НМП $X(t)$, графі станів і переходів якого щодо першої та другої розглянутих моделей наведені на рис. 1 та 2 відповідно.

Як слідує з рис. 1, система ТО відповідно до першої моделі функціонування в довільний момент часу може знаходитися в одному з таких станів: e_0 – стан, у якому об'єкт обслуговування працездатний; e_1 – стан, під час перебування в якому на об'єкті проводиться ТО за передбачений резервний час $\tau_{Д1}$; e_2 – стан, у якому відбувається відновлення працездатності об'єкта обслуговування за передбачений час резерву $\tau_{Д}$; e_3 і e_4 – стани, у яких на об'єкті проводяться відповідно ТО і поточний ремонт після закінчення резервів часу $\tau_{Д1}$ і $\tau_{Д}$; E_+ , E_- – області працездатних і непрацездатних станів об'єкта системи ТО відповідно.

Рівень надійності функціонування МІО будемо оцінювати з використанням комплексного показника надійності, для якого доцільно [4] вибрати коефіцієнт $K_{ТВ}$. Коефіцієнт $K_{ТВ}$ обчислюється як відношення МОЧ сумарного часу T_{E_+} перебування об'єкта обслуговування в працездатному стані за деякий період експлуатації до МОЧ сумарного часу перебування об'єкта в працездатному стані і простоїв, обумовлених ТО та Р МІО за той же період часу ($T_{E_+} + T_{E_-}$).

$$K_{TB}(\tau_d) = M[T_{E_+}] / M[T_{E_+} + T_{E_-}], \quad (1)$$

де $M[x]$ – математичне очікування випадкової величини x .

Формула (1) з урахуванням графа станів і переходів (рис. 1) набуде вигляду

$$K_{TB}(\tau_d) = \sum_{i=0}^2 \pi_i a_i / \sum_{i=0}^4 \pi_i a_i, \quad (2)$$

де π_i – стаціонарні ймовірності вкладеного ланцюга Маркова, які визначаються з системи рівнянь

$$\pi_i = \sum_{j \in E} P_{ji} \pi_j, \quad (3)$$

з урахуванням умови нормування $\sum_{i \in E} \pi_i = 1$.

Стаціонарні ймовірності вкладеного ланцюга Маркова π_i ($i = 0, 1, 2, 3, 4$), які входять до формули (2), визначимо із наведеної нижче системи рівнянь, отриманої відповідно до виразу (3) і з урахуванням графа станів і переходів першої моделі системи ТО та Р МІО із двох, що розглядаються (рис. 1).

$$\pi_0 = \pi_1 P_{10} + \pi_2 P_{20} + \pi_3 P_{30} + \pi_4 P_{40};$$

$$\pi_1 = \pi_0 P_{01};$$

$$\pi_2 = \pi_0 P_{02}; \quad (4)$$

$$\pi_3 = \pi_1 P_{13};$$

$$\pi_4 = \pi_2 P_{24}.$$

Ураховуючи вихідні умови функціонування системи ТО і поточного ремонту відповідно до першої моделі, можна записати такі розрахункові формули для стаціонарних ймовірностей P_{ji} і середніх інтервалів часу перебування a_i в станах i .

$$a_0 = \frac{1}{\lambda} [1 - \exp(-\lambda T_{TO})]; a_1 = \frac{1}{\theta + \gamma_1}; a_2 = \frac{1}{\mu + \gamma}; a_3 = \frac{1}{\theta}; a_4 = \frac{1}{\mu}; a_5 = \frac{1}{\mu}$$

$$P_{01} = \exp(-\lambda T_{TO}); P_{02} = 1 - \exp(-\lambda T_{TO}); P_{13} = \frac{\gamma_1}{\gamma_1 + \theta}; P_{24} = \frac{\gamma}{\gamma + \mu} \quad (5)$$

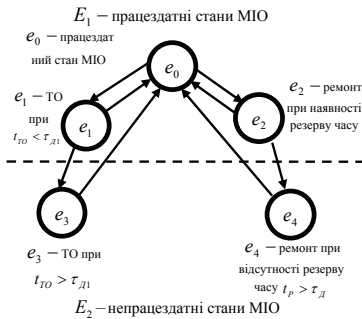


Рис. 1. Граф станів і переходів, що описує функціонування системи періодичного ТО та Р МІО

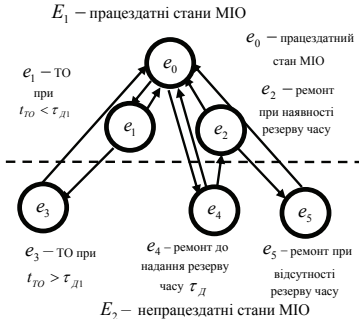


Рис. 2. Граф станів і переходів, що описує функціонування системи періодичного ТО та Р МІО з часовим резервуванням

Розв’язуючи систему рівнянь (4) і підставляючи знайдені значення π_i в (2), після нескладних математичних перетворень отримаємо проміжний вираз для $K_{ТВ}(\tau_{д})$:

$$K_{ТВ}(\tau_{д}) = \frac{a_0 + a_1 P_{01} + a_2 P_{02}}{a_0 + a_1 P_{01} + a_2 P_{02} + a_3 P_{01} P_{13} + a_4 P_{02} P_{24}} \quad (6)$$

Підставляючи в (6) значення для a_i і P_{ji} , після низки перетворень і спрощень отримаємо остаточне розрахункове співвідношення для $K_{ТВ}$

$$K_{ТВ}(\tau_{д}) = \frac{\frac{1}{\lambda} + \frac{1}{\gamma + \mu} C + e^{-\lambda T_{TO}} \left[-\frac{1}{\lambda} + \frac{1}{\gamma_1 + \theta} - \frac{1}{\gamma + \mu} C \right]}{\frac{1}{\lambda} + \frac{1}{\gamma + \mu} C + A_1 + e^{-\lambda T_{TO}} \left[-\frac{1}{\lambda} + \frac{1}{\gamma_1 + \theta} - \frac{1}{\gamma + \mu} C + B - A_1 \right]} \quad (7)$$

де
$$A = \frac{\gamma}{\mu(\gamma + \mu)}; B = \frac{\gamma_1}{\theta(\gamma_1 + \theta)} \quad (8)$$

Для другої моделі функціонування системи ТО та Р МІО (рис. 2) значимо, що в цьому випадку об'єкт обслуговування (МІО) може знаходитися у таких станах: e_0 – стан, у якому об'єкт працездатний; e_1 і e_2 – стани, у яких на об'єкті проводиться планове ТО або виконуються відновлювальні роботи протягом наперед заданих резервів часу $\tau_{Д1}$ і $\tau_{Д}$ відповідно; e_3 і e_5 – стани, на яких відповідно проводяться ТО і роботи з відновлення працездатності після закінчення резервів часу $\tau_{Д1}$ і $\tau_{Д}$; e_4 – стан, під час якого об'єкт непрацездатний, на ньому можуть проводитися або не проводитися ремонтні роботи, але використання часового резерву $\tau_{Д}$ ще неможливо, тому що ще не сплив щодобовий час використання техніки за призначенням. Тобто відповідно до графа станів і переходів другої моделі системи (рис. 2) $K_{ТВ}$ може бути поданий таким чином

$$K_{ТВ}(\tau_{Д}) = \sum_{i=0}^2 \pi_i a_i / \sum_{i=0}^5 \pi_i a_i. \quad (9)$$

Розмірковуючи аналогічно як і при розгляді першої моделі функціонування системи ТО та Р МІО, можна отримати систему рівнянь

$$\left. \begin{aligned} \pi_0 &= \pi_1 P_{10} + \pi_2 P_{20} + \pi_3 P_{30} + \pi_4 P_{40} + \pi_5 P_{50}; \\ \pi_1 &= \pi_0 P_{01}; \\ \pi_2 &= \pi_4 P_{42}; \\ \pi_3 &= \pi_1 P_{13}; \\ \pi_4 &= \pi_0 P_{04}; \\ \pi_5 &= \pi_2 P_{25}. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Розв'язання цієї системи рівнянь відносно π_i дає можливість записати формулу (9) у вигляді

$$K_{ТВ}(\tau_{Д}) = \frac{a_0 + a_1 P_{01} + a_2 P_{04} P_{42}}{a_0 + a_1 P_{01} + a_2 P_{04} P_{42} + a_3 P_{01} P_{13} + a_4 P_{04} + a_5 P_{04} P_{42} P_{25}}. \quad (11)$$

Очевидно, що для другої моделі розрахункові формули стаціонарних імовірностей P_{ji} і середніх інтервалів часу a_i перебування процесу в різ-

них станах з урахуванням вихідних умов функціонування моделі можуть бути подані такими виразами

$$a_0 = \frac{1}{\lambda} [1 - \exp(-\lambda T_{TO})]; \quad a_1 = \frac{1}{\theta + \gamma_1}; \quad a_2 = \frac{1}{\mu + \gamma}; \quad a_3 = \frac{1}{\theta}; \quad a_4 = \frac{1}{\mu};$$

$$a_5 = \frac{1}{\mu} P_{01} = \exp(-\lambda T_{TO}); \quad P_{13} = \frac{\gamma_1}{\gamma_1 + \theta}; \quad P_{04} = 1 - \exp(-\lambda T_{TO}); \quad (12)$$

$$P_{25} = \frac{\gamma}{\gamma + \mu}; \quad P_{42} = \frac{\mu}{\gamma + \mu}.$$

Тому не складно довести, що після очевидних математичних перетворень розрахункові формули для коефіцієнта технічного використання МІО другої моделі функціонування системи будуть мати такий вигляд:

$$K_{TB}(\tau_D) = \frac{\frac{1}{\lambda} + \frac{1}{\gamma + \mu} C + e^{-\lambda T_{TO}} \left[-\frac{1}{\lambda} + \frac{1}{\gamma_1 + \theta} - \frac{1}{\gamma + \mu} C \right]}{\frac{1}{\lambda} + \frac{1}{\gamma + \mu} C + A_1 + e^{-\lambda T_{TO}} \left[-\frac{1}{\lambda} + \frac{1}{\gamma_1 + \theta} - \frac{1}{\gamma + \mu} C + B - A_1 \right]} \quad (13)$$

$$\text{де } A_1 = \frac{1}{\mu} + A * C; \quad A = \frac{\gamma}{\mu(\gamma + \mu)}; \quad B = \frac{\gamma_1}{\theta(\gamma_1 + \theta)}; \quad C = \frac{\mu}{\gamma + \mu}. \quad (14)$$

Отже, отримані аналітичні співвідношення для розрахунку K_{TB} МІО при їх періодичному технічному обслуговуванні і відновленні для двох варіантів надання резерву часу τ_{D1} і τ_D :

теоретично-абстрактного, коли резерв часу надається миттєво відразу після відмови в процесі функціонування МІО (формула 7);

практично-можливого, при якому резерв часу вступає в дію тільки після завершення щоденного робочого часу використання МІО за призначенням (формула 14).

Це створює придатні умови для теоретичного дослідження впливу як величин резервів часу τ_{D1} і τ_D , так і особливостей його вводу в дію у процесі функціонування періодичної системи ТО та Р МІО з часовою надмірністю на комплексний показник надійності – K_{TB} МІО $K_{TB}(\tau_D)$.

Для побудови графіків коефіцієнта $K_{TB}(\tau_D)$ можна скористатися програмним середовищем MATLAB – сучасним засобом автоматизації

математичних розрахунків, що основана на розширеному уявленні і застосуванні матричних операцій [5].

Аналіз отриманих залежностей переконує в такому:

1. Використання почасового резервування організаційного типу при проведенні робіт ТО та Р МІО може забезпечити значне підвищення комплексного показника надійності МІО при ТО в порівнянні з його значеннями для випадку відсутності такого резерву часу на 10–20 %.

2. При розрахунку коефіцієнта $K_{ТВ}(\tau_d)$ доцільно користуватися співвідношенням (13), тому що використання формули (7) дає суттєво завищені показники надійності МІО порівняно з їх практично досяжними значеннями.

Висновок. Отже, аналіз наведених залежностей і реалізація їх у подальшому у графічному варіанті переконливо свідчить про те, що впровадження періодичної системи ТО та Р МІО з часовою надмірністю завдяки використанню щодобових простоїв техніки як резерву часу МІО дозволить суттєво підвищити ефективність системи ТО та Р МІО в цілому.

Список використаної літератури

1. Солонніков В. Г. Особливості та проблеми технічного забезпечення частин і підрозділів інженерних військ Збройних Сил України у ході виконання завдань у складі міжнародних миротворчих сил / В. Г. Солонніков, О. Л. Колос // Труды академії. – 2008. – № 4 (84). – С. 152–161.
2. Солонніков В. Г. Відновлення техніки у ході виконання завдань миротворчими підрозділами Збройних Сил України / В. Г. Солонніков, В. В. Горшколепов, О. Л. Колос // Збірник наукових праць. – № 4. – 2006. – С. 125–130.
3. Креденцер Б. П. Модели технического обслуживания систем с избыточностью / Б. П. Креденцер, С. В. Ленков, М. И. Резников, В. В. Зубарев ; под ред. Б. П. Креденцера. – К. : Фенікс, 2002. – 192 с.
4. Креденцер Б. П. Прогнозирование надежности систем с временной избыточностью / Б. П. Креденцер. – К. : Наукова думка, 1978. – 240 с.
5. Дьяконов В. П. MATLAB 6/6.1/6.5+Simulink в математике и моделировании : / полное руководство пользователя / В.П. Дьяконов. – М. : СОЛОН-Прес, 2003. – 576 с.

Рецензент – кандидат технічних наук Нагачевський В. Й.

Стаття надійшла до редакції 11.11.2013.

Колос А. Л. Математическая модель функционирования системы технического обслуживания и ремонта машин инженерного вооружения в условиях их интенсивного применения

В статье средствами теории почасового резервирования обосновывается целесообразность использования плановых простоев машин инженерного вооружения для проведения профилактических работ технического обслуживания и текущего ремонта с целью поддержания ее надежности на необходимом уровне в случае интенсивной их эксплуатации. Для количественной оценки влияния процесса организации функционирования системы технического обслуживания в соответствии с предложенной моделью системы технического обслуживания на смену уровня надежности техники разработана математическая модель расчета коэффициента технического использования машин инженерного вооружения, которая учитывает не идеализированные, а реальные возможности относительно использования ежесуточных простоев техники в качестве резерва для ее технического обслуживания и ремонта.

Ключевые слова: *техническое обслуживание, ремонт машин, инженерное вооружение.*

Kolos O. L. Mathematical model of functioning of the system technical maintenance of engineering armament machines under the conditions of their intensive application

The article touches upon the substantiation of expediency of application of planned devices of engineering armament by means of theory of hourly reserving with the purpose of maintenance of its reliability at the necessary level in cases of their intensive exploitation. For the quantitative estimation of influence of process of organization of functioning of the system of technical maintenance in accordance with the offered model of the system of technical maintenance on the change of level of reliability of technique the mathematical model of calculation of coefficient of the technical use of machines of engineering armament is worked out taking into account not ideal but the real possibilities of using of everyday outages of devices as reserve for their technical maintenance.

Keywords: *technical maintenance, devices repair, engineering armament.*