

PROVIDING COMPLEX ELECTRONIC SYSTEMS WITH SPARE ELEMENTS WITHIN RELIABILITY-CENTERED MAINTENANCE

Georgiev, Anton Slavchev, Technical University – Varna, georgiev_an@tu-varna.bg
Nikolov, Nikolay Ivanov, Technical University – Varna, nikolay.nikolov@tu-varna.bg

Abstract: This article concerns some reliability-centered maintenance aspects of complex technical systems [1]. The problems in regard to provision of complex electronic systems with required number and type of spare components needed during it's operation are analyzed. A method for optimization of the repairable spare components number for such systems when conducting a reliability-centered maintenance is developed and suggested.

Keywords: spare components, reliability of electronic systems, reliability-centered maintenance of electronic systems.

ОСИГУРЯВАНЕ СЪС ЗАПАСНИ ЕЛЕМЕНТИ НА СЛОЖНИ ЕЛЕКТРОННИ СИСТЕМИ ПРИ НАДЕЖДНОСТНО ОРИЕНТИРАНО ТЕХНИЧЕСКО ОБСЛУЖВАНЕ

Антон Славчев Георгиев, Технически Университет – Варна, georgiev_an@tu-varna.bg
Николай Иванов Николов, Технически Университет – Варна nikolay.nikolov@tu-varna.bg

Абстракт: Статията е посветена някои аспекти на надеждно ориентираното техническо обслужване и ремонт на сложни технически системи [1]. Анализирани са проблемите, свързани с осигуряването на сложни електронни системи по време на експлоатация с необходимия брой и вид запасни елементи. Разработена и предложена е методика за оптимизиране броя на възстановяемите запасни елементи, при провеждане на надеждно ориентирано техническо обслужване и ремонт на тези системи.

Ключови думи: запасни елементи, надеждност на електронни системи, надеждно ориентирано техническо обслужване и ремонт на електронни системи.

ПРЕДВАРИТЕЛНИ УТОЧНЕНИЯ

Под запасен елемент, съгласно действащите стандарти се разбира елемент, предназначен да замени намиращ се в експлоатация аналогичен елемент от дадена система (при отказ на последния, или при изтичане на техническия му ресурс), с цел осигуряване на нейната работоспособност [2].

В зависимост от предназначението и начина на използване на запасните елементи те се обособяват в три комплекта: единичен, ремонтен и групов.

Единичният комплект от запасни елементи се осигурява с доставянето на всяка сложна електронна система (СЕС). Предназначен е да обезпечи работоспособността на системата, като осигури необходимото ниво на експлоатационната и надеждност в периода от време, ограничен от две пълни възстановявания. След извършване на частично-възстановителни процедури, единичният комплект от запасни елементи се доокомплектова до първоначалния си вид. Обемът и съставът на този комплект се определя от конструкторския колектив на базата на детайлно изследване на надеждностните показатели на системата за период от време, равен на времето между две пълни профилактични възстановявания (или две пълни аварийни възстановявания) в съответствие с възприетата стратегия за техническо обслужване [4], [5], [6].

Ремонтният комплект е съставен от възстановяеми и невъзстановяеми елементи и комплектуващо оборудване, необходими за извършване на пълно възстановяване на една система. Този комплект се създава и използва при осигуряване експлоатационната надеждност, чрез надеждно ориентирано техническо обслужване и ремонт (НОТОР) на СЕС в случай, че тя не е включена в група от еднотипни, аналогични на нея системи. Окомплектоването му се извършва от служители в състава на персонала, извършващ техническото обслужване, като използват априорния си опит и отчитат големината на отработения ресурс. В този случай за доставка и ремонт на запасни части се прилага едношелонна структура.

Груповият комплект се състои от възстановяеми и невъзстановяеми елементи и комплектуващо оборудване, необходими за осъществяване на НОТОР на съвкупност от еднотипни системи. Окомплектоването му се извършва след задълбочено изследване на априорните данни за надеждността, отчитане на производствения риск и загубите, произтичащи от престоя на системата, както и от изискванията за стойността на коефициента на готовност. В този случай за доставка и ремонт на запасни части се прилага многошелонна структура.

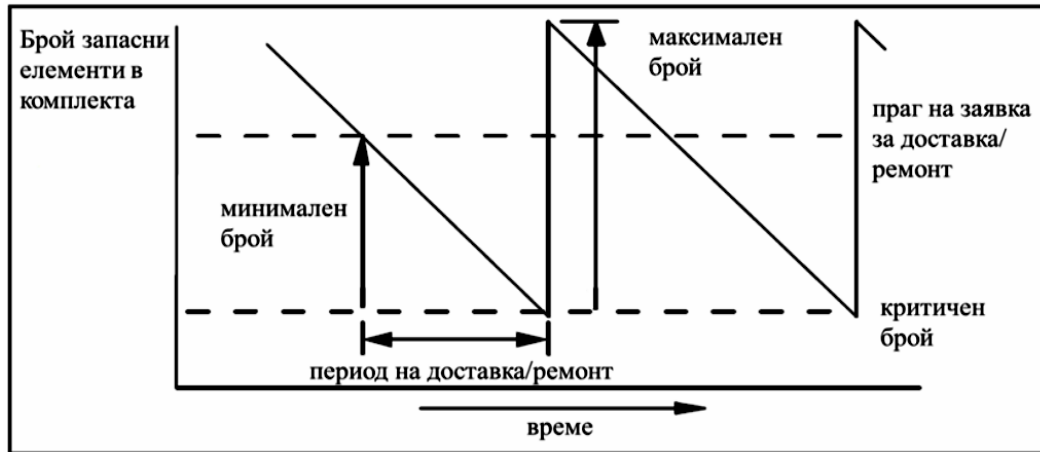
Предмет на анализ в настоящата работа са въпросите, касаещи попълването на груповия комплект със запасни елементи, при провеждане на НОТОР.

СПЕЦИФИКА НА ОСИГУРЯВАНЕТО СЪС ЗАПАСНИ ЕЛЕМЕНТИ НА СЛОЖНИ ЕЛЕКТРОННИ СИСТЕМИ

Отказът на елемент е случайно събитие, поради което е невъзможно достоверно да се предскаже кой елемент кога ще откаже. Ето защо, за да изпълни предназначението си, груповият комплект трябва да съдържа богата гама от елементи. Ако в момента на настъпване на отказ, в груповия комплект не се съдържа запасният елемент, необходим за замяна на отказалия, СЕС престава да изпълнява своите функции до осигуряване на необходимия липсващ елемент, т.е. тя остава в състояние на престой, причинен от неподходящото съставяне на груповия комплект. Ако броят на елементите в комплекта е недостатъчен, системата ще се попада често в състояние на принудителен престой, което намалява коефициента и на техническо използване. По такъв начин тя няма да е в състояние пълноценно да изпълнява предназначението си, коефициентът ѝ на готовност ще се понижи. В резултат – ще се влоши профитът на СЕС [4], [5], [6].

За да се избегне състоянието на принудителен престой, обслужващите звена понякога съставят групов комплект с необосновано голям излишък. Стойността на ненужно големия групов комплект може да се окаже съизмерима със (а често дори няколкократно по-голяма от) стойността на самата система. Решаващо в този аспект е обстоятелството, че броят на запасните елементи в комплекта е тясно свързан с експлоатационните разходи и ефективността на техническото обслужване. Излишното завишаване на броя запасни елементи е неприемливо, поради влагането на средства, неносещи печалба. Освен това, ненужно завишеният брой запасни елементи води до продължителния им престой при съхранение, което е свързано с поява на откази в някои от тях. Броят на елементите в груповия комплект се изменя динамично в процеса на НОТОР. Вариациите на това изменение са показани на *фиг.1*. Съществено значение по време на експлоатацията на СЕС имат максималният, минималният и критичният брой на елементите в комплекта (*фиг. 1*). Определяща роля за осигуряване зададената надеждност на СЕС има критичният брой запасни елементи в комплекта, докато максималният брой се определя от критерии, свързани с икономическата ефективност на експлоатационния процес. На *фиг. 1* е показан също и броят запасни елементи, определен като праг за отпращане на заявка за доставка/ремонт, както и необходимото технологично време за извършване на доставка/ремонт.

Създаването и поддържането на складова база за съхраняване на груповия комплект е свързано с повишаване на експлоатационните разходи на СЕС. Провеждането на тренировъчни процедури с цел поддържане надеждността на някои от продължително съхраняваните елементи също води до допълнителен разход на средства и време.



Фиг. 1. Вариации на броя запасни елементи в груповия комплект при провеждане на надеждностно ориентирано техническо обслужване и ремонт

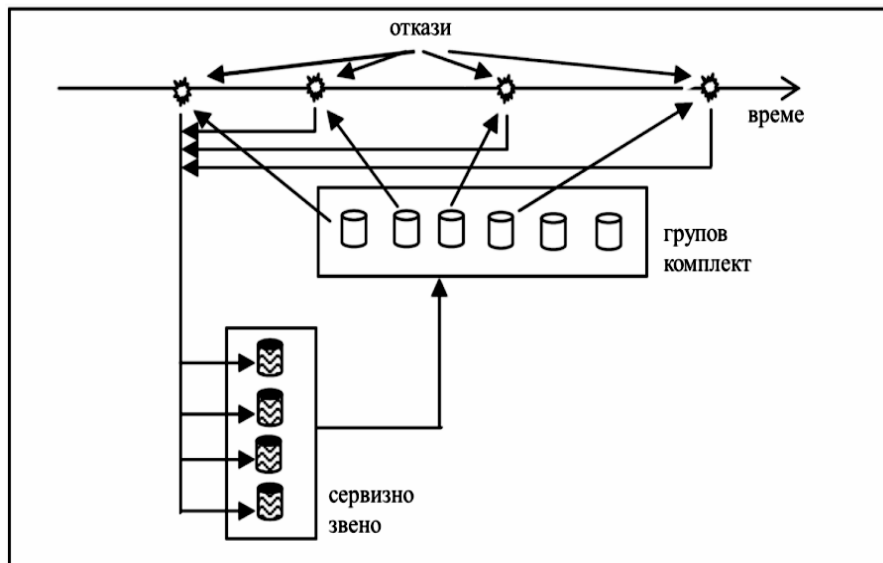
Всичко казано до тук налага извода, че за оптимален може да се счита такъв избор на вида и броя на запасните елементи, при който груповият комплект има минимална стойност, но осигурява поддържането на работоспособността на електронната система с вероятност, превишаваща зададената.

ОПРЕДЕЛЯНЕ КОЛИЧЕСТВОТО ВЪЗСТАНОВЯЕМИ ЗАПАСНИ ЕЛЕМЕНТИ В ГРУПОВИЯ КОМПЛЕКТ

Елементите на СЕС най-често представляват електронни блокове и модули, които от гледна точка на надеждността се определят като възстановяеми изделия, тъй като след отказ е технически възможно и целесъобразно възстановяването на техните функционални характеристики. Стратегията за НОТОР на сложни електронни системи изисква провеждане на периодични действия от обслужващия персонал, за идентифициране посредством контролно тестване на пълен, или частичен отказ на елемент, както и на елемент в предотказно състояние [3]. Идентифицираният елемент следва да се замени с изправен. Отказалият елемент се ремонтира от сервизно звено и заема мястото на заменилия го елемент в груповия комплект. Стремещт е броят на запасните елементи в комплекта да бъде запазен. Обменът на запасни елементи в процеса на НОТОР е представен графично на *фиг. 2*. По оста на времето са отбелязани моментите на настъпване на откази, след които отказалите елементи се демонтират и заменят с изправни запасни елементи, взети от състава на груповия комплект. Отказалите елементи се отправят към сервизното звено за ремонт и възстановяване. Отремонтираните елементи с възстановени функционални параметри попълват състава на груповия комплект, където остават на разположение за евентуална замяна на отказали елементи. Процесът на обмен на запасни елементи продължава по време на целия срок на експлоатация на СЕС. Той представлява съществена част от процеса на НОТОР.

Ще бъде анализирана ситуация при която: въведената в експлоатация СЕС разполага с групов комплект от запасни елементи; оперативният и ремонтен персонал провежда НОТОР, при които липсва периодична доставка на допълнителни, нови запасни елементи; при установен процес на експлоатация, идентифицираните неизправни еле-

менти на СЕС се заменят с изправни такива от състава на груповия комплект. Във всеки момент от време определен брой възстановяеми елементи се намират в неизправно състояние, изчаквайки своя ред да бъдат ремонтирани и да попълнят състава на груповия комплект.



Фиг. 2. Обмен на запасни елементи в процеса на надеждно ориентираното техническо обслужване и ремонт

Времето за възстановяване на отказалия елемент е величина със случайна стойност, поради което броят на неизправните възстановяеми елементи от комплекта също е случайна величина. При настъпване на отказ на възстановяем елемент и липса на изправен запасен елемент от същия вид системата изпада в състояние на принудителен престой.

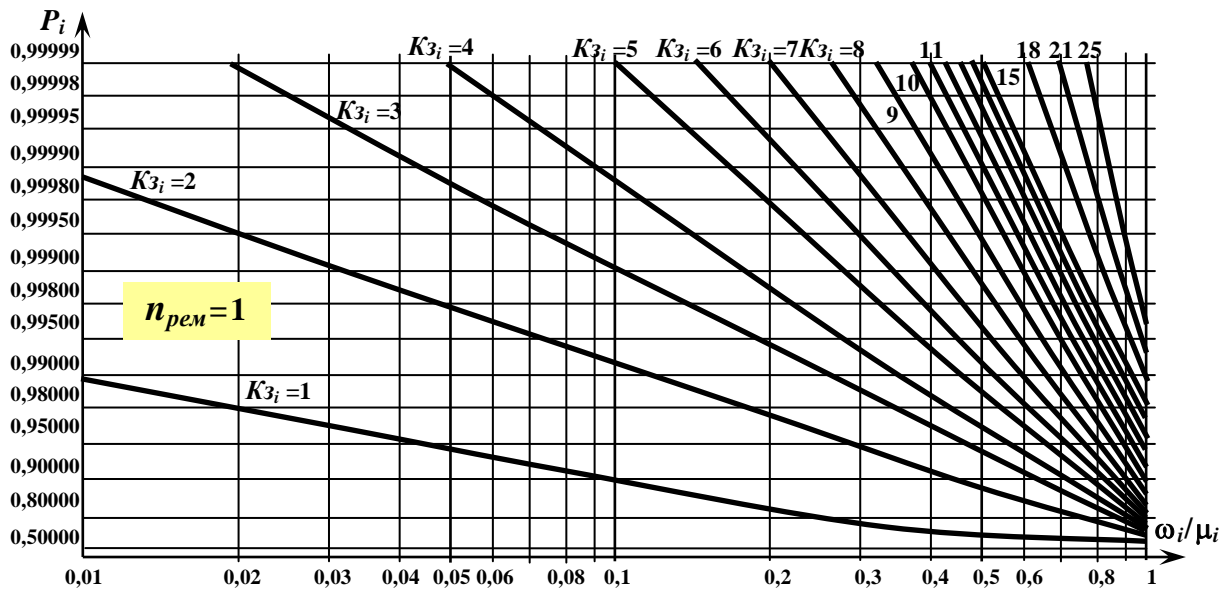
Задачата за изчисляване на необходимия брой възстановяеми запасни елементи се заключава в това, да се определи такава стойност на броя запасни елементи K_{zi} от всеки вид, при която, вероятността P_i , че в произволно избран момент от време поне един от i -тия вид запасни елементи ще се намира в изправно състояние, да не бъде по-малка от предварително зададената.

Необходимите изходни данни за търсене на решението при така формулираната задача са:

- средната отработка между отказите T_{cpi} , на елементите от i -тия вид (или параметъра на потока на отказите им ω_i);
- средното време за възстановяване T_{vi} на елементите от i -тия вид (или интензивността на възстановяването им μ_i);
- сумарният брой на монтираните възстановяеми елементи K_{pi} от i -тия вид;
- броят на ремонтните места в сервизното звено (или броят на едновременно ремонтираните възстановяеми елементи в сервизното звено, в случай че на едно работно място могат едновременно да бъдат ремонтирани два, или повече елементи);
- времето за транспорт до сервиза T_{mp} (в случай, че действа централизирано сервизно звено, обслужващо няколко еднотипни електронни системи с различно местоположение на експлоатация) - този параметър е включен в параметъра средно време за възстановяване T_{vi}
- предварително зададената (или изчислена) вероятност $P_{zadi}(T_{np})$ за достатъчност на елементите от i -тия вид за периода T_{np} между два поредни периодични контролни теста.

Преобладаващата част (над 90%) от отказите в СЕС са внезапни, поради което,

предложената методика за изчисляване броя на възстановяемите запасни елементи е съобразена преди всичко с този вид откази. За да не се усложнява допълнително анализа, приемаме, че процеса работа-отказ-възстановяване-работа на възстановяемите елементи и на системата, продължава неограничено дълго време.



Фиг. 3 Вероятност в произволно избран момент от време поне един запасен елемент от i -тия вид да е в изправно състояние - P_i , във функция от стойността на отношението ω_{0i}/μ_i и броя запасни елементи от i -тия вид - K_{zi} , при 1 работно място за ремонт на елементите от i -тия вид

За да бъде изпълнена поставената задача - поддържане работоспособността на електронната система чрез замяна на отказалите елементи и елементите в предотказно състояние със запасни, за изходните данни трябва да е изпълнено неравенството

$$(1) \quad \frac{T_{Bi}}{n_{PEM}} \leq \frac{T_{CPI}}{K_{Pi}}$$

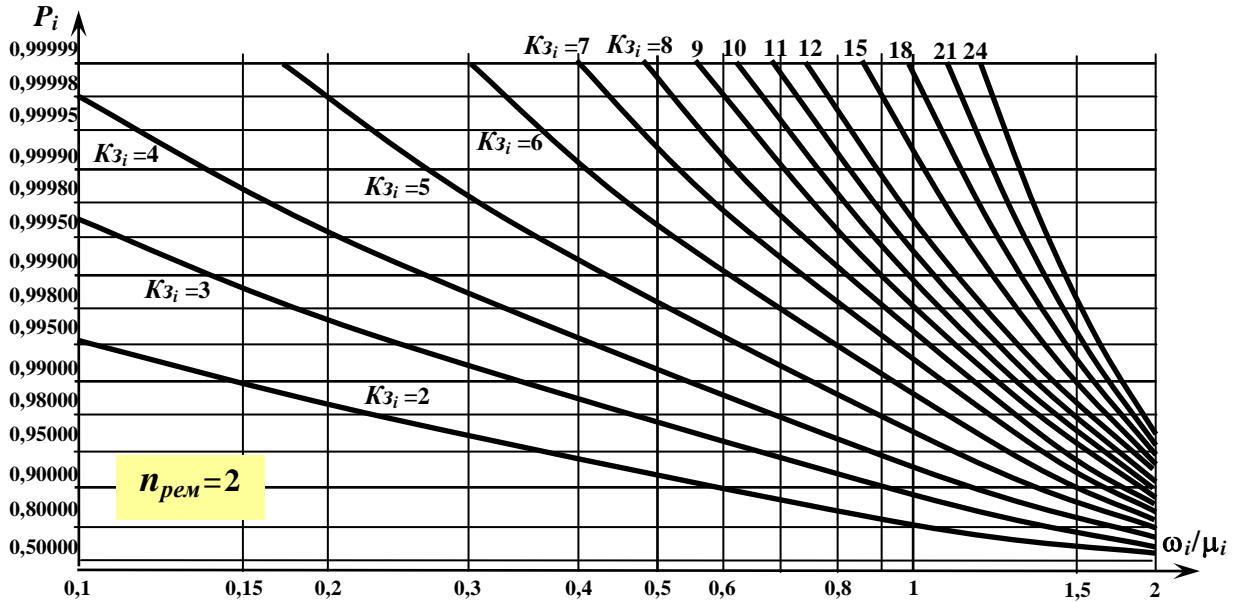
Неравенство (1) изразява условието: потокът на отказите да бъде по-малък от потока на възстановяванията (средният брой отказали елементи от всеки вид, за единица време, да бъде по-малък от средния брой възстановени елементи от всеки вид, за единица време). Тогава, броят запасни елементи може да се определи от теоремата на Уилксон-Ман-Уитни от теорията за масовото обслужване [7]. Според тази теорема, в система за масово обслужване с ограничена дължина на опашката за чакане, вероятността да бъдат запълнени всички канали за обслужване и всички места от опашката за изчакване се определя от израза:

$$(2) \quad P_{n_0 + K_i} = \frac{(\omega_i/\mu_i)^{n_0 + K_i}}{K_i! K_i^{n_0}} \cdot \frac{\sum_{a=0}^{K_i} \frac{(\omega_i/\mu_i)^a}{a!} + \frac{(\omega_i/\mu_i)^{K_i}}{K_i!}}{\sum_{\omega_i/\mu_i=1}^{n_0} \frac{\omega_i/\mu_i}{K_i}}$$

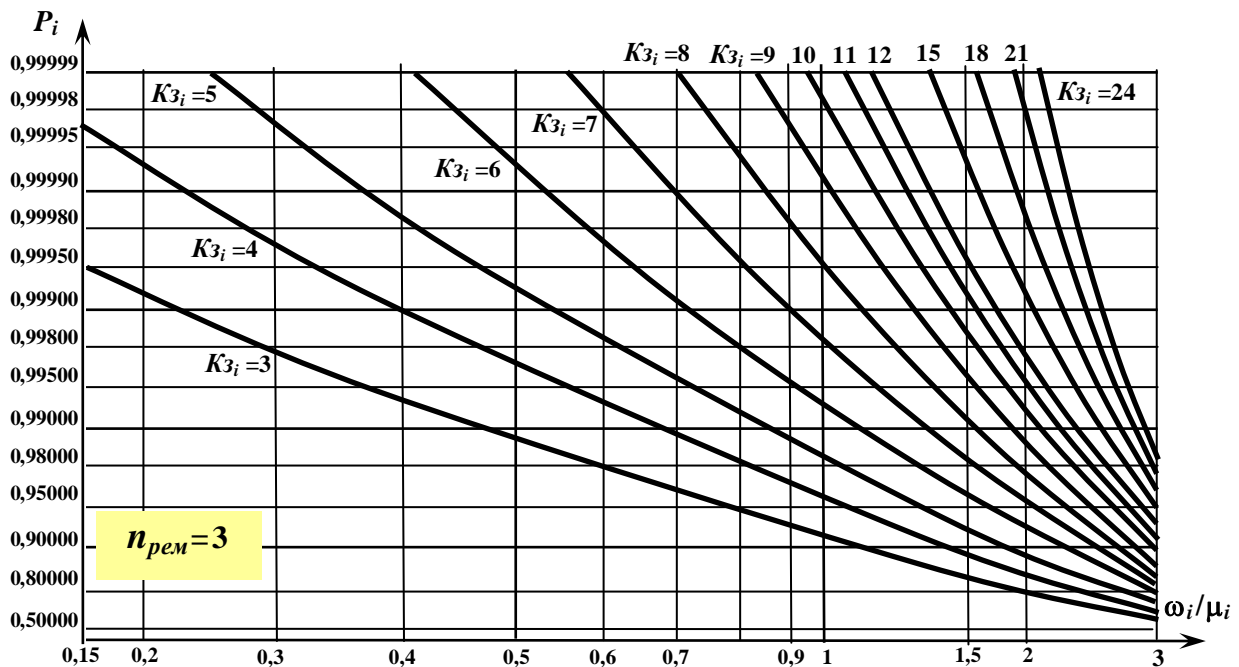
Броят запасни елементи от i -тия вид, съгласно израз (2) трябва да бъде равен на сумата от местата за изчакване на опашката за ремонт n_0 и необходимия гарантиран минимален брой изправни запасни елементи $K_{з.и.и}$, т.е.

(3) $K_{z_i} = n_0 + K_{z.u.i.}$

Чрез израз (2) може да се изрази вероятността всички възстановяеми запасни елементи да се намират в процес на възстановяване, или изчакващи своя ремонт. Следователно задачата може да се формулира така: с помощта на израз (2), да се определи ве-



Фиг. 4 Вероятност в произволно избран момент от време поне един запасен елемент от i -тия вид да е в изправно състояние - P_i , във функция от стойността на отношението ω_{0i}/μ_i и броя запасни елементи от i -тия вид - K_{z_i} , при 2 работни места за ремонт на елементите от i -тия вид



Фиг. 5 Вероятност в произволно избран момент от време поне един запасен елемент от i -тия вид да е в изправно състояние - P_i , във функция от стойността на отношението ω_{0i}/μ_i и броя запасни елементи от i -тия вид - K_{z_i} , при 3 работни места за ремонт на елементите от i -тия вид

роятността $P_{n_0+K_{3,u,i}}$ удовлетворяваща условието

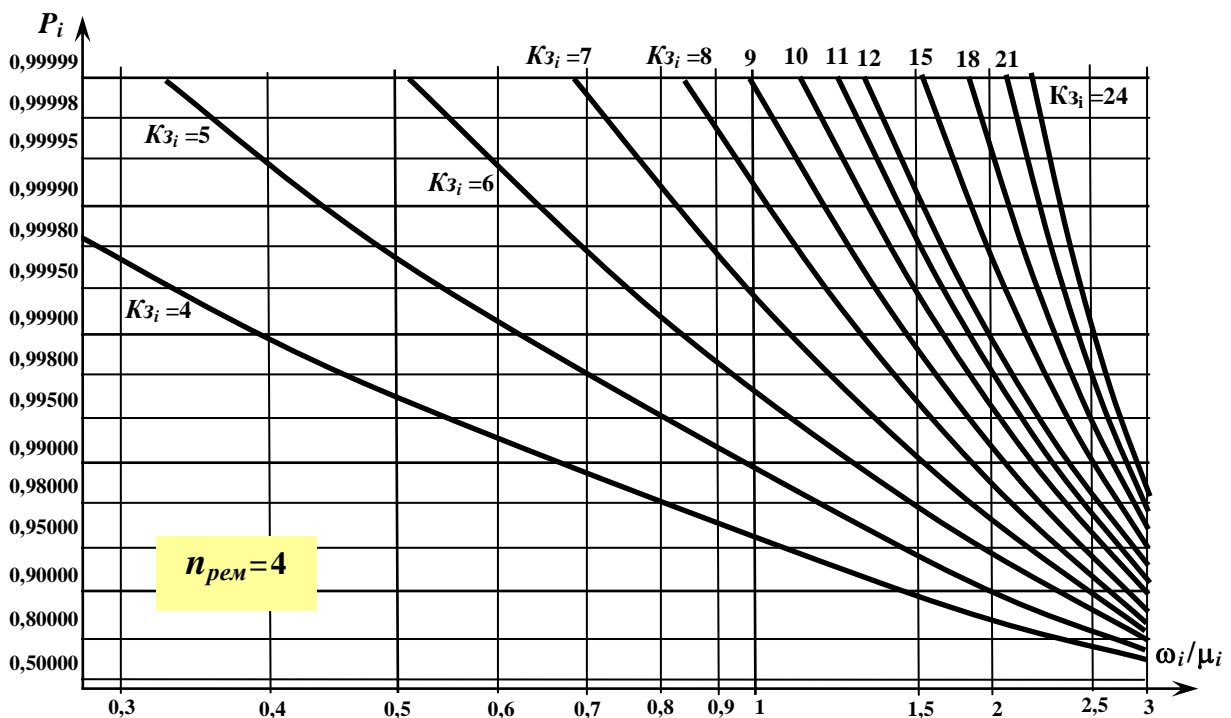
$$(4) \quad 1 - P_{n_0+K_{3,u,i}} \geq P_i.$$

На *фиг. 3*, *фиг. 4*, *фиг. 5* и *фиг. 6* са показани номограми, разработени с помощта на израз (2), улесняващи определянето на необходимия брой възстановяеми запасни елементи.

Номограмите отчитат различния брой ремонтни места в сервиза - *фиг. 3* е за едно ремонтно място, съответно *фиг. 4*, *фиг. 5* и *фиг. 6* са за две, три и четири ремонтни места. По абсцисите на номограмите са нанесени стойностите на вероятностите P_i , а по ординатите - стойностите на отношението ω_{0i}/μ_i , като за изчисляване на това отношение се използва зависимостта

$$(5) \quad \omega_{0i}/\mu_i = T_{B_i} \cdot K_{P_i} / T_{CP_i}.$$

От номограмите, чрез фамилията криви с номера от 1 до 20 се отчита съответната



Фиг. 6 Вероятност в произволно избран момент от време поне един запасен елемент от i -тия вид да е в изправно състояние - P_i , във функция от стойността на отношението ω_{0i}/μ_i и броя запасни елементи от i -тия вид - K_{z_i} , при 4 работни места за ремонт на елементите от i -тия вид

стойност за необходимия брой запасни елементи K_{z_i} . Последователността при работата с номограмите е следната:

- избира се номограма, съответстваща на съществуващия брой ремонтни места в сервиза (местата на които се ремонтира само i -тия вид възстановяеми елементи);

- с помощта на изчисленото по формула (5) отношение ω_{0i}/μ_i и зададената величина $P_{зад_i}$ се определя точка от номограмата, съответстваща на броя запасни елементи K_{z_i} ;

- цялочислената стойност на K_{z_i} се избира чрез най-близката крива, минаваща над точката с координати ω/μ_i , $P_{зад_i}$.

Данните се нанасят в таблица (*таблица 1*).

Таблица 1

Наименование и значение на възстановимия елемент	Средна отработка между отказите на възстановимия елемент от i-тия вид T_{CPi}	Средно време за възстановяване на елемент от i-тия вид T_{Bi}	Брой монтирани елементи от i-тия вид K_{pi}	Част от денонощието, използувана за ремонтна дейност A	Брой ремонтни места в сервиса n_{PEM}	Предаварително зададена вероятност за достатъчност на елементите от i-тия вид за периода м ежду две поредни доставки $P_{зад}(T_{пр})$	отношение ω_i/μ_i	Брой запасни елементи от i-тия вид K_{zi}
1.								
2								
.....								
i								
i+1								
.....								

За илюстриране на изложените по-горе идеи може да се разгледа пример, при който трябва да се осигурят запасни елементи за съвместно работещи еднотипни електронни апаратури (мултиплексни комуникационни апаратури в зали „Високочестотни уредби” [8], [9]). Необходимо да се определи броя запасни елементи K_{zi} , осигуряващ вероятност за недопускане на престои $P_i \geq 0,99$ (дължащи се на липсата на запасни канални преобразуватели) и е известно, че: в зала “ВЧ-уредби” работят едновременно 4000 канални преобразуватели ($K_{pi}=4000$), средната отработка между отказите им е $T_{cp}=60000h$, средното време за възстановяване - $T_{Bi}=2$ часа, работният ден на специалиста, ремонтиращ преобразуватели е 8 часа, работата в сервиса е така организирана, а каналните преобразуватели се ремонтират само на едно работно място ($n_{рем} = 1$). При така формулираната задача чрез израз (5) може да се определи стойността на отношението ω_i/μ_i за непрекъснатата работа на ремонтното звено (за 24-часова работа). Осем часовия работен ден се отразява чрез коефициента A , показващ каква част от времето в денонощието се използва за ремонтна дейност.

$$\omega_{0_i} / \mu_i = T_{Bi} \cdot K_{pi} / T_{CPi} \cdot A = 2 \cdot 4000 / 60000 \cdot \frac{8}{24} = 0,4$$

От номограмата за $n_{рем}=1$ (фиг.3) за $\omega_i/\mu_i=0,4$ и $P_i \geq 0,99$ се определя необходимия брой запасни канални преобразуватели $K_{zi} = 5$.

Ако трябва да се определят необходимият брой модулатори на първични групи (като $20 \geq K_{zi}$) и минималният брой работни места, за осигуряване на вероятността $P_i \geq 0,995$ и е известно, че в зала “ВЧ-уредби” работят едновременно 600 модулатора на първични групи ($K_{pi}=600$), средната отработка между отказите им е $T_{cp}=9000$ часа, средното време за възстановяване - $T_{Bi}=4,2$ часа. Известно е също, че работното време на специалиста, ремонтиращ модулаторите е 8,5 часа, но за ремонт на този блок той отделя средно 3,2 часа на ден. Тогава при

$$\omega_{0_i} / \mu_i = T_{Bi} \cdot K_{pi} / T_{CPi} \cdot A = 4,2 \cdot 600 / 9000 \cdot \frac{3,2}{24} = 2,1,$$

условията за минимален брой работни места, $20 \geq K_{zi}$ и $P_i \geq 0,995$ се удовлетворяват от номограмата, показана на фиг.3. От тази номограма (за $n_{рем}=1$) за $P_i=0,997$ може да се отчете необходимият брой модулатори $K_{zi} = 13$.

ИЗВОДИ И ЗАКЛЮЧЕНИЯ

Предложената методика дава възможност да се оптимизира процеса на НОТОР, по отношение броя на оперативния и ремонтен персонал. Тя може да се прилага за оптимизиране както на ремонтната дейност, така също и на дейността по идентифициране на елементи в предотказно състояние и отказали елементи.

Прилагането на тази методика позволява да се сведат до минимум както презапа-

сяването със запасни елементи, така и престоите на СЕС, дължащи се на липса на запасни елементи.

Методиката има практическо приложение за широк кръг СЕС намиращи се в установен процес на експлоатация. Нещо повече – тя може да се използва и за други сложни технически обекти, чиято надеждност е от съществено значение за безопасните условия на труд, здравето и живота на хората.

References

- [1] Георгиев А. Сл. Нова концепция за повишаване на експлоатационната надеждност на електронни системи. Монография “Аквапринт” ООД, ISBN 978-954-92824-6-7, Варна, 2013.
- [2] MIL-STD-335, REPAIR PARTS AND SPECIAL TOOLS LIST (15 JUL 1984)
- [3] SAE JA1012 A Guide to the Reliability-Centered Maintenance (RCM) Standard, January 2002.
- [4] Георгиев А. Сл. Блокова стратегия със зони на бездействие при техническото обслужване на електронни системи. Електронно списание „Компютърни науки и комуникации” брой 1, 2013 г. стр.7-14. ISSN: 1314-7846 <http://ojs.bfu.bg/index.php/knk/article/view/40/72>
- [5] Георгиев А. Сл. Блокова стратегия с минимални аварийни и пълни профилактични възстановявания при техническото обслужване на електронни системи. Електронно списание „Компютърни науки и комуникации” брой 1, 2013 г. стр.15-20. ISSN: 1314-7846 <http://ojs.bfu.bg/index.php/knk/article/view/41/73>
- [6] Георгиев А. Сл. Блокова стратегия за техническото обслужване с аварийни възстановявания, чийто обем зависи от момента на настъпване на отказа. Електронно списание „Компютърни науки и комуникации” брой 2, 2013 г. стр.53-61. ISSN: 1314-7846 <http://ojs.bfu.bg/files/knk-2013-2.pdf>
- [7] Lloyd E., W. Ledermann. Handbook of applicable mathematics. Volume 4. New York, 1997.
- [8] Пранчов Р. Б., А. С. Георгиев, Н. Г. Георгиева. Отчет по договор №184-11/90 на тема: “Оценка на експлоатационната надеждност на уплътнителни телефонни системи УТС100”, с ръководител доц. д-р инж. Р.Б. Пранчов, заявител Комитет по съобщения и информатика, НИС ТУ-София, С., 1991
- [9] Пранчов Р. Б., П. Славейков, А. С. Георгиев. Отчет по договор №353/88 на тема: “Изследване надеждността на уплътнителни телефонни системи УТС100”, с ръководител доц. д-р инж. Р. Б. Пранчов, заявител Комитет по съобщения и информатика, НИС ВМЕИ-София, С., 1989.