

АНАЛИТИЧЕН ПОДХОД И МОДЕЛ ЗА АНАЛИЗ И ОЦЕНКА НА БЕЗОПАСНОСТТА НА ЧОВЕКОМАШИННИ СИСТЕМИ ЗА УПРАВЛЕНИЕ НА ЕКСПЛОАТАЦИОННИЯ ПРОЦЕС В ТРАНСПОРТА

Христо Христов, Мария Христова, Николай Георгиев
chchristov@yahoo.com, mhristova@vtu.bg, safetyniky@mail.com

**Висше транспортно училище “Тодор Каблешков”, ул. “Гео Милев” 158, София 1574,
БЪЛГАРИЯ**

Ключови думи: Транспорт, безопасност, човекомашинни системи

Резюме: Осигуряването на надежден и безопасен превозен процес в различните видове транспорт е един от най-важните елементи на тяхната качествена работа. Натрупаният експлоатационен опит у нас и в чужбина недвусмислено показва, че този проблем става все по-актуален. Той би могъл да бъде отнесен към най-сериозните и комплексни проблеми на съвременността, тъй като надеждността на транспортния процес зависи не само от нормалното функциониране на техническите средства (подвижен състав, осигурителна техника, железен път, други), но също и от адекватното поведение на експлоатационния персонал (включително и от нивото на оптимално съгласуване на характеристиките на човека-оператор и техническите средства). С други думи, съответната техническа (машинна) система в транспорта (проектирана с цел извършване на характерни операции по отношение управлението на експлоатационния процес) е едната компонента, от която зависи сигурността на движението. Другата компонента е човекът-оператор (диспечер, влаков машинист, ръководител на движение, водач на автомобил), който е в непрекъснато взаимодействие с машината (диспечерска или гарова централизация, бордова система на локомотива, система за автоматично водене и пр.).

Последните няколко десетилетия бележат определен интерес към въпросите, свързани с анализа, моделирането и оценката на поведението на човекомашинните системи (включително и в транспорта). Това доведе до значително нарастване броя на изследванията, научните трудове и публикациите. Веднага трябва да се изтъкне, че значителен брой от тях са посветени на решаването на частни задачи. Новото време и особеностите на техническата експлоатация на транспорта обаче изискват комплексно решаване на проблема. В този смисъл, настоящата разработка предлага комплексен аналитичен подход и модел за анализ на човекомашинни системи за управление на превозния процес в различните видове транспорт.

Въз основа на метода „анализ на състоянията“ (анализ на Марков) настоящата статия предлага аналитичен подход и модел за анализ и оценка на безопасността на човекомашинни системи за управление на експлоатационния процес в транспорта. На базата на реални данни от техническата експлоатация са определени показателите за безопасност на конкретна железопътна човекомашинна система. Разработеният модел е универсален и е практически приложим (при наличието на необходимите статистични

данни за изчисляване параметрите на модела) за анализ и оценка на безопасността на ред човекомашинни системи в транспорта.

1. Същност на проблема

Осигуряването на надежден и безопасен превозен процес в различните видове транспорт е един от най-важните елементи на тяхната качествена работа. Натрупаният експлоатационен опит у нас и в чужбина недвусмислено показва, че този проблем става все по-актуален. Той би могъл да бъде отнесен към най-сериозните и комплексни проблеми на съвременността, тъй като надеждността на транспортния процес зависи не само от нормалното функциониране на техническите средства (подвижен състав, осигурителна техника, железен път и др.), но също и от адекватното поведение на експлоатационния персонал (включително и от нивото на оптимално съгласуване на характеристиките на човека-оператор и техническите средства). С други думи, съответната техническа (машинна) система в транспорта (проектирана с цел извършване на характерни операции по отношение управлението на експлоатационния процес) е едната компонента, от която зависи сигурността на движението. Другата компонента е човекът-оператор (диспечер, влаков машинист, ръководител на движение, водач на автомобил), който е в непрекъснато взаимодействие с машината (диспечерска или гарова централизация, бордова система на локомотива, система за автоматично водене и пр.).

Последните няколко десетилетия бележат определен интерес към въпросите, свързани с анализа, моделирането и оценката на поведението на човекомашинните системи (включително и в транспорта). Това доведе до значително нарастване броя на изследванията, научните трудове и публикациите. Веднага трябва да се изтъкне, че значителен брой от тях са посветени на решаването на частни задачи. Новото време и особеностите на техническата експлоатация на транспорта обаче изискват комплексно решаване на проблема. В този смисъл, настоящата разработка предлага комплексен аналитичен подход и модел за анализ на човекомашинни системи за управление на превозния процес в различните видове транспорт.

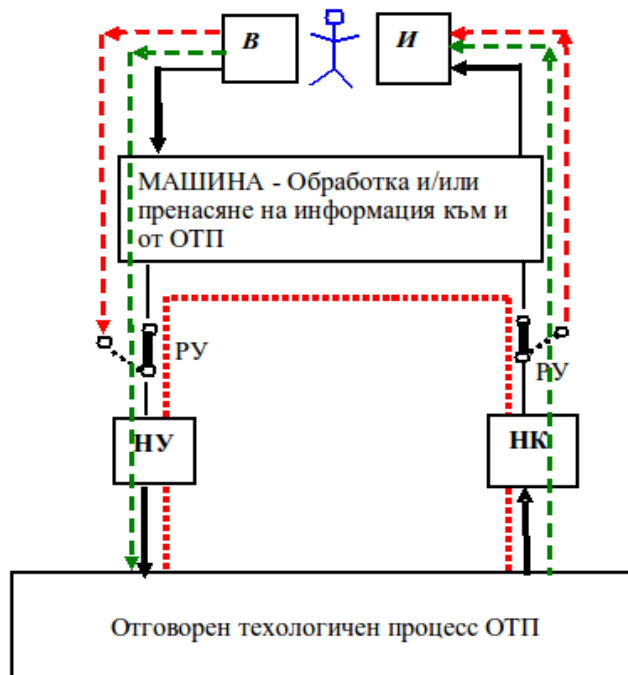
2. Модел за анализ и оценка на безопасността на човекомашинна система за управление на транспортния процес

2.1. Структура на човекомашинна система за управление на отговорни технологични процеси в транспорта

Структурата на характерна човекомашинна осигурителна система има вида, показан на фигура 1. Машината (в случая е разгледана гарова централизация) управлява и контролира отговорния технологичен процес (**ОТП**) – осигуряване на железопътното движение.

Чрез средствата за непосредствен контрол (**НК**) се сменя информация от процеса, която се обработва и извежда за визуализация и индикация (**ВИ**). Операторът наблюдава състоянието на управляваните обекти и експлоатационната ситуация като цяло.

Когато се подаде управляваща команда (за отваряне на сигнал, обръщане на стрелка и др.), машината разпознава необходимостта от промяна. Обработва се и/или се пренася информация. Формират се въздействия към ОТП, които се подават към ОТП чрез средствата за непосредствено управление (**НУ**) (специфичния интерфейс към управляваните обекти). Когато командата се изпълни, в системата за управление се установява съответствие между това, което трябва да е, и това, което е. Новото състояние се регистрира от техническите средства за визуализация и индикация (табло, монитор). Картината се запазва до нова команда или до промяна на състоянието на някои от обектите, което се случва под въздействието на самия ОТП. Той си има своите закономерности на протичане.



Фиг. 1. Структурна схема на човеко-машинния интерфейс в железопътна осигурителна система

При нова команда кръгът отново се затваря. И така, непрекъснато.

При изправна машина този процес представлява взаимодействие в човекомашинния интерфейс (**Man-machine interface – MMI**) между два компонента: операторът и машината.

Безсмислено е да се търсят решения, чрез които човекът-оператор да се отстрани от управлението, защото и в най-модерните системи остават задачи (операции), които и досега не могат да се решават без човека, или пък се решават, но при наличието на недопустимо големи разходи. Затова и днес се счита, че машинистът, пилотът, диспечерът, ръководителят на движение, водачът, обобщено - **операторът**, е и ще остане неотменима компонента на човекомашинния комплекс (интерфейс), управляващ движението. Важното е той да се облекчи от обичайните операции и отговорни рутинни действия и се съсредоточи върху вземането на решения, които машината трудно може или е невъзможно да вземе. За целта работното място на оператора се автоматизира, а машината поема неговите отговорности за безопасността на управлявания процес.

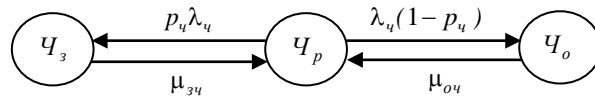
2.2. Моделиране поведението (състоянията) на човека-оператор и машината

Както беше посочено по-горе, **операторът** е единият елемент на човекомашинната система, другият елемент на която е машината (техническото устройство). Взаимодействието между тях, макар че следва определени правила и алгоритми, е далеч от детерминираност, т.е. то е (квази) случаен процес.

Очевидно в интересувашото ни множество се касае за поток от случайни събития: решения на оператора, манипулации, отваряне и затваряне на сигнали, обръщане на стрелки, спирания и тръгване на возила, движение, и пр., които настъпват в нерегламентирано време и последователност. Този поток би могъл да се опише на поасонон. Псевдослучаен е и процесът на движение на транспортните средства, който се управлява от интерфейса. В кой точно момент, какво точно ще се случи не е предварително известно, макар и очакванията за него в различни моменти от времето t да са с различна вероятност.

Към тези „щатни“ събития се наслагват откази, които са случайни, нерегламентирани и привеждат MMI в едно от трите състояния: Готовност (Availability), Опасност (Hazard) и Сигурност (Safety). Потокът от откази и възстановявания, както и преходите между състоянията, очевидно притежава ординарност и липса на последиствие и би могъл да се

оприличи на поасонов. Ако се приеме тази теза, показатели за безопасност на ММІ могат да бъдат готовността на интерфейса да работи безопасно $A_{ММІ}$ и средното време $MTBF_{ММІ}$ между опасните откази на ММІ.



Фиг.2.Граф на състоянията на човека-оператор на железопътна осигурителна система

В съответствие с така направените разсъждения и предпоставки (които се приемат за адекватни), в настоящата разработка *методът на марковските процеси и вериги* е приет за най-подходящ инструмент за моделиране процеса на взаимодействие между оператора и машината. Следва да се уточни, че той ще се приложи в модификация, която позволява директно намиране на търсените зависимости.

Разглежда се работата на ръководител на движението като оператор на железопътна гарова осигурителна система и нека:

- λ_q е интензивността на грешките на оператора;
- p_q - вероятността грешките да са защитни (т.е. те могат да се компенсират с допълнителни манипулации и не водят до опасност за движението, а само до неефективност или промяна на предварително разработен и приет експлоатационен план);
- μ_{0q} - интензивността на възстановяване (излизане) от опасни грешки;
- μ_{3q} - интензивността на възстановяване на защитни грешки.

Ако се приеме, че след грешката си операторът предприеме компенсиращи действия с цел неутрализирането ѝ, то графът, описващ неговото функциониране (състояния) ще има вида на фигура 2.

Означенията на фигурата са както следва:

- Ch_p - работоспособно състояние на човека;
- Ch_o - опасно състояние на човека;
- Ch_3 - защитно състояние на човека;
- $\lambda_q(t)$ - интензивност на отказите (грешките) на човека;
- $\mu_{0q}(t)$ - интензивност на възстановяване от опасно състояние;
- μ_{3q} - интензивност на възстановяване от защитно състояние;
- p_q - вероятност грешката на оператора да е защитна.

В съответствие с теоретичните постановки на марковския процес, определянето на вероятностите за всяко от трите състояния Ch_p , Ch_o и Ch_3 изисква решаването на системата от диференциални уравнения на Колмогоров:

$$(1) \left| \begin{array}{l} \frac{dP_p(t)}{dt} = -[\lambda_q(1-p_q) + p_q\lambda_q]P_p(t) + \mu_{3q}P_3(t) + \mu_{0q}P_o(t) \\ \frac{dP_3(t)}{dt} = p_q\lambda_qP_p(t) - \mu_{3q}P_3(t) + 0 \\ \frac{dP_o(t)}{dt} = \lambda_q(1-p_q)P_p(t) + 0 - \mu_{0q}P_o(t) \end{array} \right|$$

При $t \rightarrow \infty$ тази система се свежда до системата обикновени уравнения:

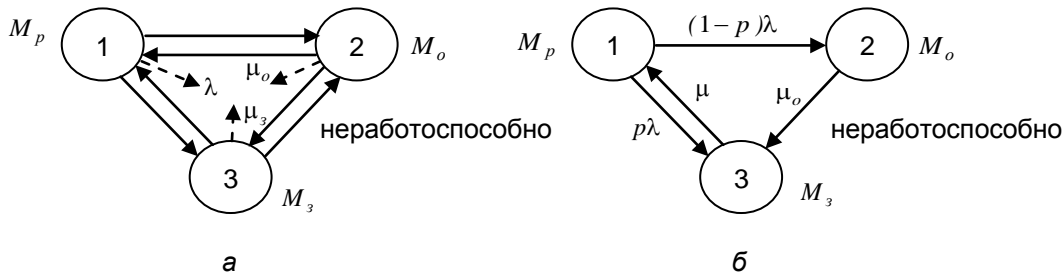
$$(2) \quad \begin{cases} \lambda_q P_p(t) + \mu_{3q} P_3(t) + \mu_{oq} P_o(t) = 0 \\ p_q \lambda_q P_p(t) - \mu_{3q} P_3(t) = 0 \\ \lambda_q (1 - p_q) P_p(t) - \mu_{oq} P_o(t) = 0 \end{cases},$$

която при условието $P_p(t) + P_3(t) + P_o(t) = 1$ има следното решение:

$$(3) \quad P_o(t) = \frac{\frac{\lambda_q (1 - p_q) p_q \lambda_q}{p_q \lambda_q + \mu_{3q}} - \lambda_q (1 - p_q)}{\left[\frac{\lambda_q (1 - p_q) p_q \lambda_q}{p_q \lambda_q + \mu_{3q}} - \mu_{oq} - \lambda_q (1 - p_q) \right]}, \quad P_3(t) = \frac{p_q \lambda_q [1 - P_o(t)]}{p_q \lambda_q + \mu_{3q}},$$

$$P_p(t) = 1 - \frac{\frac{\lambda_q (1 - p_q) p_q \lambda_q}{p_q \lambda_q + \mu_{3q}} - \lambda_q (1 - p_q)}{\left[\frac{\lambda_q (1 - p_q) p_q \lambda_q}{p_q \lambda_q + \mu_{3q}} - \mu_{oq} - \lambda_q (1 - p_q) \right]} - \frac{p_q \lambda_q [1 - P_o(t)]}{p_q \lambda_q + \mu_{3q}}.$$

Машината също има три състояния (Фиг. 3,а), но тъй като от практическа гледна точка някои преходи са много малко вероятни (и пренебрежими), може да се работи с модела (графа) от фигура 3,б.



Фиг.3.Марковски модел на железопътна осигурителна система

Означенията на фигурата са както следва:

- M_p - работоспособно състояние;
- M_o - опасно състояние;
- M_3 - защитно състояние;
- $\lambda(t)$ - интензивност на отказите;
- $\mu_o(t)$ - интензивност на възстановяване от опасно състояние;
- $\mu_3 = \mu$ - интензивност на възстановяване от защитно състояние;
- p - вероятност отказът на машината да е защитен.

Вероятностите на трите състояния на машината могат да се намерят като решения на системата хомогенни диференциални уравнения на Колмогоров:

$$(4) \quad \left. \begin{aligned} \frac{dP_{1M}(t)}{dt} &= -[\lambda(1-p) + p\lambda] \cdot P_{1M}(t) + 0 + \mu P_{3M}(t) \\ \frac{dP_{2M}(t)}{dt} &= \lambda(1-p)P_{1M}(t) - \mu_d P_{2M}(t) + 0 \\ \frac{dP_{3M}(t)}{dt} &= p\lambda P_{1M}(t) + \mu_d P_{2M}(t) - \mu P_{3M}(t) \end{aligned} \right\},$$

като най-общият им вид е както следва:

$$(5) \quad \begin{aligned} P_{1M}(t) &= \Gamma(t) = A_1 + B_1 e^{r_1 t} - C_1 e^{r_2 t} - \text{функция на готовност;} \\ P_{2M}(t) &= H(t) = A_2 + B_2 e^{r_1 t} - C_2 e^{r_2 t} - \text{вероятност за опасна работа;} \\ P_{3M}(t) &= Z(t) = A_3 + B_3 e^{r_1 t} - C_3 e^{r_2 t} - \text{вероятност за защитни престои,} \end{aligned}$$

където r_1, r_2 са корени на характеристичното уравнение при Лапласова трансформация.

Когато моделираният процес е хомогенен марковски (потокът от събития е обикновен поток) всички параметри на преходите $\lambda(t)$, p , $\mu_d(t)$ и μ са константни и не са зависими от времето. Тогава функциите на работоспособност $\Gamma(t)$, защитно $Z(t)$ и опасно състояние $H(t)$ при $t \rightarrow \infty$ се стремят (асимптотично приближават) към постоянни величини (коэффициенти), които им съответстват:

$$(6) \quad \begin{aligned} \Gamma(t) &= K_{AM} = \frac{\mu\mu_d}{\mu\mu_d + \lambda[(1-p)\mu + \mu_d]} \\ &\text{коэффициент на готовност на машината;} \\ H(t) &= K_{HM} = \frac{\mu\lambda(1-p)}{\mu\mu_d + \lambda[(1-p)\mu + \mu_d]} \\ &\text{коэффициент на опасна работа на машината} \\ Z(t) &= K_{ZM} = \frac{\mu_d\lambda}{\mu\mu_d + \lambda[(1-p)\mu + \mu_d]} : \\ &\text{коэффициент на защитни престои на машината.} \end{aligned}$$

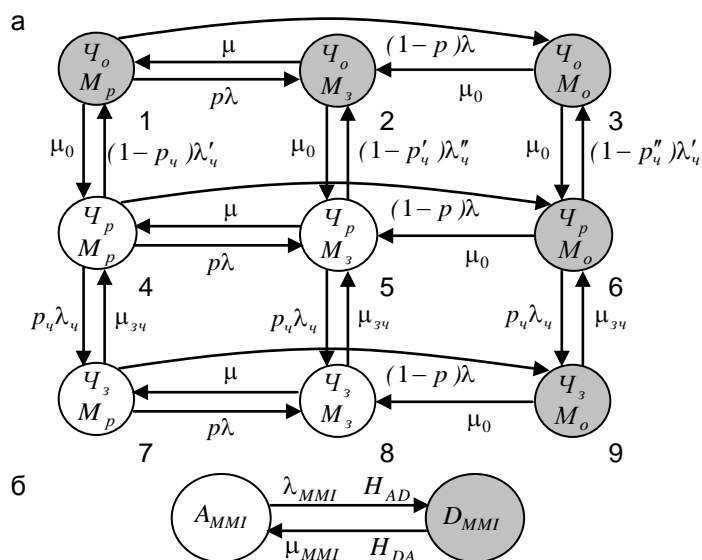
2.3. Моделиране взаимодействието на оператора и машината при осигуряване безопасност на системата за управление

В процеса на управление на експлоатационния процес двете страни на човекомашинния интерфейс влизат във взаимодействие. Както беше посочено по-горе, всяка една от тях има по три състояния и по принцип всяко едно може да влезе в комбинация с всяко друго (така общият брой състояния в модела на човекомашинния интерфейс е $3^2 = 9$).

Моделът на състоянията и преходите на човекомашинния интерфейс е изграден на базата на моделите от фигури 2 и 3 и е показан на фигура 4. Нека наречем тези 1,2,...9 възли *парциални състояния*. Свързващите дъги на графа (фигура 4) характеризират възможните преходи между отделните парциални състояния (при всяка една от тях е отбелязана и съответната интензивност на прехода).

При конструирането на модела са приети следните предпоставки:

- Процесът е хомогенен марковски, т.е. параметрите на преходите λ , λ_q , p , p_q , μ_q и μ са постоянни във времето.



Фиг.4.Граф на състоянията на човеко-машинния интерфейс

Потокът от откази, грешки и възстановявания е поасонов, а значи и ординарен. Следователно няма едновременни събития в машината и човека, предизвикващи преходи в графа по диагонал поради по обща причина. Има само ортогонални преходи.

- По хоризонтала се изменя състоянието на машината, а по вертикала – на оператора.
- Когато машината работи опасно M_o , то и ММИ е в опасно състояние. Тя директно влияе на процеса независимо от интерфейса. Опасни са и трите парциални състояния 3, 6 и 9.
- Когато машината е в защитно състояние M_z , опасно е само състояние 2, когато човекът-оператор греша опасно.
- Опасно би било и състояние 1, ако въобще има вероятност да се случи. То е налице, когато при работеща машина M_p има непредвидени и непокрити (по ресурсни и други причини) пространства, в които на оператора се предостави възможност за намеса в безопасността.

Освен това се има предвид, че интензивността на отказите на човека са зависими от състоянието на машината. Следователно, трябва да се отчитат важни особености на човекомашинния интерфейс в осигурителните системи:

- Когато машината е работоспособна (M_p) и е перфектно създадена:

А. Интензивността на грешките λ'_4 , която се изчислява като реципрочната стойност на средното време между две последователни грешки на оператора, е твърде ниска, защото при изправна машина той извършва рутинни манипулации, с които е свикнал и често пъти работи автоматично;

Б. Преходът $(1-p_4)\lambda'_4$ от парциално състояние 4 към парциално състояние 1 би трябвало да отсъства, защото операторът, и да иска, не може да създаде опасна ситуация. Възможността в работоспособно състояние на машината M_p операторът да влияе на безопасността е нулева. Няма вероятност грешни манипулации да се реализират като опасни, т.е. $p_4 = 1$.

- Когато машината е отказала защитно M_z , чрез превключване към резервно операторът поема управлението пряко като извършва предвидените по регламент действия по съгласуване, разпломбиране и т.н. Това му се случва рядко, той е в стрес, в екстремални условия и интензивността на грешките му нараства значително. Интензивността на прехода от парциално състояние 5 към 2 е $(1-p'_4)\lambda''_4$.

- Когато машината е отказала опасно M_o , операторът не е в критична ситуация.

Той не знае за опасния ѝ отказ. Но сега са опасни не само нейните откази, пряко влияещи на ОТП, но и грешките му. Сега някои от отказите снемат забраната на оператора да извършва манипулации, противоречащи на условията за безопасност. Променя се съотношението между вида на грешките и прехода от б към 3 е $(1 - p_{q''})\lambda_{q'}$.

Очевидно ММІ има само **две състояния**: *работоспособно* и *опасно*. Ако грешките на оператора са опасни, то и човекомашинната система може да работи опасно. Но защитни престои няма. В защитно състояние на машината операторът въвежда команди и комплексът работи, макар и по друга технология – чрез резервното управление.

Тази постановка е специфична за осигурителните системи и отличава проблема за тяхната безопасност и надеждност от надеждността на човекомашинните системи въобще.

За да се намери търсения аналитичен модел на безопасността на ММІ, е необходимо да се окрупни графа от фигура 4,а, така както е показано на фигура 4,б. Парциалните състояния могат да се обединят в две състояния на окрупнения граф:

-състояние на готовност $A_{ММІ}$ на интерфейса;

-опасно състояние $H_{ММІ}$ на интерфейса.

Всяко от парциалните състояния е произведение от вероятностите двете компоненти – операторът (човекът) и машината да бъдат в съответното на парциала състояние.

Например:

Състояние 2 и състояние 4 имат вероятности:

$$(7) \quad P_2 = P_o K_{ZM},$$

$$(8) \quad P_4 = P_p K_{AM},$$

където:

P_o и P_p са определени по уравнение (3), а K_{ZM} и K_{AM} по уравнение (6).

Готовността на човекомашинния интерфейс след време $t \rightarrow \infty$ да работи безопасно представлява сума от вероятностите за пребиваването ѝ в състояния 4, 5, 7 и 8:

$$(9) \quad K_{aММІ} = P_p K_{AM} + P_p K_{zМ} + P_z K_{pМ} + P_z K_{zМ} = (P_p + P_z)(K_{AM} + K_{ZM}).$$

Човекомашинният интерфейс след време $t \rightarrow \infty$ ще работи опасно в съответствие със сумата от вероятностите за пребиваването ѝ в състояния 1, 2, 3, 6 и 9:

$$(10) \quad K_{dММІ} = K_{HM} + P_o(K_{AM} + K_{ZM}) \approx K_{HM} + P_o K_{ZM}.$$

3. Приложение на модела

Разработеният в точка 2 теоретичен модел е приложен за анализ на конкретна ММІ „Гарова осигурителна система – ръководител на движението“. Събрани са данни по отношение на отказите (повредите) на електромеханична осигурителна инсталация (гара Горна баня), както и такива относно поведението на експлоатационния персонал.

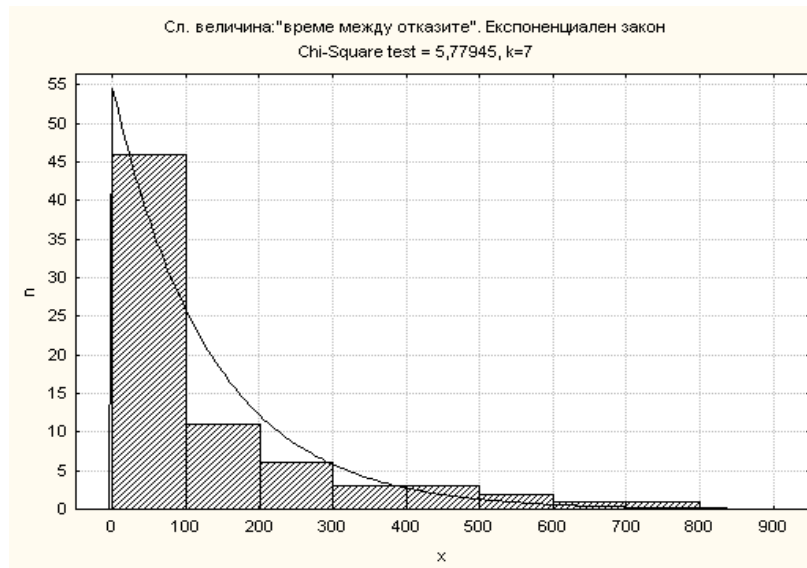
3.1. Определяне на коефициентите K_{AM} , K_{HM} и K_{ZM}

С цел определяне на коефициентите на „готовност“, „опасна работа“ и „защитни престои“ на изследваната гарова осигурителна система са събрани и анализирани данни (за една година) относно допуснатите повреди (описани в книга VII-51: *книга за повредите*). Всички регистрирани откази (общо 73) могат да се дефинират като защитни, като най-често срещаните са:

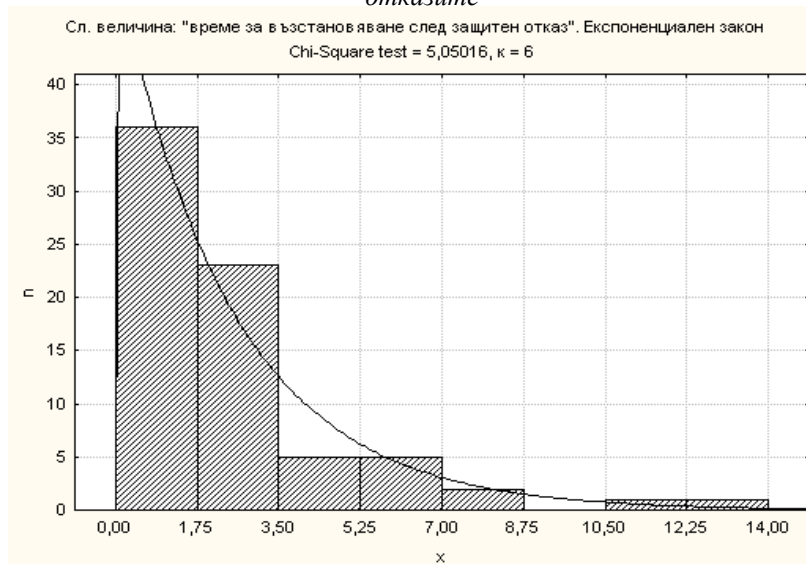
- изкуствена заетост на стрелка;
- изкуствена заетост на коловоз или предучастък;
- липса на контрола на стрелка;

- блокиране на КСР (коловозно сигнална ръчка);
- не се вдигат бариерите след преминал влак на АПУ;
- изгорял предпазител на стрелка (контролен или работен ток) и т.н.

С помощта на програмен продукт *Statistica 7* са изследвани случайните величини *време между отделните откази (повреди)* и *време за възстановяване след защитен отказ*. Проведеният анализ показва, че те са разпределени по експоненциален закон с параметри, както следва: $\lambda_3 = 0,0075h^{-1}$ (интензивност на отказите) и $\mu_3 = 0,4h^{-1}$ (интензивност на възстановяването след защитен отказ). Получените при обработката на статистичните данни критерии за оценка и съгласуваност показват висока адекватност на моделите (експоненциален закон) – фигури 5 и 6.



Фиг.5.Закон за разпределение на случайната величина: "Време между отказите"



Фиг.6.Закон за разпределение на случайната величина: "Време за възстановяване след защитен отказ"

Въз основа на представения в точка 2 теоретичен модел, както и при ползване на резултатите, получени след анализа на статистичните данни по отношение на цитираните по-горе случайни величини е възможно определянето на показателите K_{AM} , K_{HM} и K_{ZM} . В

таблица 1 са представени резултатите от съответните изчисления по отношение на тези показатели в зависимост от стойностите на параметрите на надеждността μ_z , μ_o , p и λ .

3.2. Определяне на показателите на надеждността на човека $P_o(t)$, $P_z(t)$ и $P_p(t)$

За описаната по-горе железопътна подсистема са събрани данни и относно допусканите грешки на човека-оператор в процеса на осигуряване на железопътното движение. За изследвания период от 5 години са допуснати общо 16 грешки, които могат да се дефинират като защитни и са от следните два основни вида: отваряне на изходен сигнал от грешен коловоз и погрешно затваряне на отворен (даден) изходен сигнал преди заминаване на влака. Макар и не така изчерпателна, събраната информация позволява предположението за експоненциален закон за разпределение на случайните величини *време (интервал) между отделните грешки и време за възстановяване след защитна грешка* с параметри $\lambda_{зч} = 0,00036h^{-1}$ и $\mu_{зч} = 12h^{-1}$.

		p	λ	μ_z				
				0,01	0,4	1	10	
μ_o	0,01	0,99	0,00757576	0,009900248	0,285097192	0,498113208	0,902872777	1
				7,50019E-05	0,002159827	0,003773585	0,006839945	2
				0,007500188	0,005399568	0,003773585	0,000683995	3
		0,999	0,00750751	0,009900917	0,285653013	0,499812383	0,908470877	1
				7,43312E-06	0,000214454	0,000375235	0,000682035	2
				0,00743312	0,005361355	0,003752345	0,000682035	3
		0,9999	0,00750075	0,009900983	0,285708163	0,499981249	0,909028924	1
				7,42648E-07	2,14303E-05	3,75023E-05	6,8184E-05	2
				0,00742648	0,005357564	0,003750234	0,00068184	3
	0,1	0,99	0,00757576	0,009900916	0,285652456	0,499810678	0,908465244	1
				7,50069E-06	0,000216403	0,000378644	0,000688231	2
				0,007500694	0,005410084	0,003786445	0,000688231	3
		0,999	0,00750751	0,009900983	0,285708157	0,499981232	0,909028868	1
				7,43317E-07	2,14496E-05	3,75361E-05	6,82454E-05	2
				0,00743317	0,00536239	0,003753613	0,000682454	3
		0,9999	0,00750075	0,009900989	0,285713673	0,499998125	0,90908471	1
				7,42648E-08	2,14307E-06	3,75036E-06	6,81882E-06	2
				0,007426485	0,005357667	0,003750361	0,000681882	3
	1	0,99	0,00757576	0,009900983	0,285708102	0,499981061	0,909028304	1
				7,50074E-07	2,16446E-05	3,78774E-05	6,88658E-05	2
				0,007500744	0,005411138	0,003787735	0,000688658	3
		0,999	0,00750751	0,009900989	0,285713673	0,499998123	0,909084705	1
				7,43318E-08	2,145E-06	3,75374E-06	6,82496E-06	2
				0,007433175	0,005362494	0,00375374	0,000682496	3
0,9999		0,00750075	0,00990099	0,285714224	0,499999812	0,909090289	1	
			7,42649E-09	2,14307E-07	3,75037E-07	6,81886E-07	2	
			0,007426485	0,005357677	0,003750374	0,000681886	3	

1 $\Rightarrow K_{AM}$ 2 $\Rightarrow K_{HM}$ 3 $\Rightarrow K_{ZM}$

Табл.1

В таблица 2 са представени резултатите от извършените изчисления (в съответствие с описания по-горе модел) по отношение на показателите на надеждността на човека-оператор в зависимост от стойностите на параметрите p , $\mu_{зч}$, $\mu_{оч}$ и $\lambda_{ч}$.

		$p_{ч}$	$\lambda_{ч}$	$\mu_{зч}$			
				10	12	15	
$\mu_{оч}$	0,01	0,9	0,0004	0,003983921	0,003983945	0,003983969	1
				3,58553E-05	2,98796E-05	2,39038E-05	2
				0,995980224	0,995986176	0,995992128	3
		0,99	0,00036364	0,000363491	0,000363493	0,000363495	1
				3,59856E-05	2,99882E-05	2,39907E-05	2
				0,999600523	0,999606519	0,999612514	3
		0,999	0,00036036	3,60334E-05	3,60337E-05	3,60339E-05	1
				3,59974E-05	2,9998E-05	2,39986E-05	2
				0,999927969	0,999933968	0,999939968	3
	0,1	0,9	0,0004	0,000399826	0,000399828	0,00039983	1
				3,59843E-05	2,99871E-05	2,39898E-05	2
				0,99956419	0,999570185	0,99957618	3
		0,99	0,00036364	3,6361E-05	3,63612E-05	3,63614E-05	1
				3,59974E-05	2,9998E-05	2,39986E-05	2
				0,999927642	0,999933641	0,99993964	3
		0,999	0,00036036	3,60346E-06	3,60348E-06	3,6035E-06	1
				3,59986E-05	2,9999E-05	2,39993E-05	2
				0,999960398	0,999966398	0,999972397	3
	1	0,9	0,0004	3,9997E-05	3,99972E-05	3,99974E-05	1
				3,59973E-05	2,99979E-05	2,39985E-05	2
				0,999924006	0,999930005	0,999936004	3
		0,99	0,00036364	3,63622E-06	3,63624E-06	3,63626E-06	1
				3,59986E-05	2,9999E-05	2,39993E-05	2
				0,999960365	0,999966365	0,999972364	3
0,999		0,00036036	3,60347E-07	3,60349E-07	3,60352E-07	1	
			3,59987E-05	2,99991E-05	2,39994E-05	2	
			0,999963641	0,999969641	0,99997564	3	

1 $\Rightarrow P_o(t)$ 2 $\Rightarrow P_s(t)$ 3 $\Rightarrow P_p(t)$

Табл.2

3.3. Определяне на показателите $K_{амми}$ и $K_{дмми}$ на изследваната човекомашинна система

При определени въз основа на статистични данни параметри $\lambda_3 = 0,0075h^{-1}$, $\mu_3 = 0,4h^{-1}$, $\lambda_{зч} = 0,00036h^{-1}$ и $\mu_{зч} = 12h^{-1}$ и при приети $\mu_{оч} = 0,1h^{-1}$, $p_{ч} = 0,99$, $\mu_o = 0,1h^{-1}$ и $p = 0,999$ са получени следните стойности на показателите, характеризиращи безопасното и опасно състояние на изследваната система: $K_{амми} = 0,291$ и $K_{дмми} = 0,000022$.

4. Заключение

Независимо от значителното развитие на техническите средства (в посока повишаване нивото на тяхната надеждност и безопасност) за управление на технологичните процеси в транспорта, човекът-оператор все още е, и несъмнено ще остава неотменим и особено важен елемент на човекомашинния комплекс (от един или друг вид), осигуряващ надеждност и безопасност на движението. Ето защо е безсмислено определянето на нивото на безопасност поотделно само на човека или само на машината, т.е. необходим е комплексен подход за моделиране безопасността на човекомашинната система като цяло.

В този смисъл, въз основа на метода „анализ на състоянията“ (анализ на Марков) настоящата статия предлага аналитичен подход и модел за анализ и оценка на безопасността на човекомашинни системи за управление на експлоатационния процес в транспорта. На

базата на реални данни от техническата експлоатация са определени показателите за безопасност на конкретна железопътна човекомашинна система. Разработеният модел е универсален и е практически приложим (при наличието на необходимите статистични данни за изчисляване параметрите на модела) за анализ и оценка на безопасността на ред човекомашинни системи в транспорта.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Barger, P., Schön, W., Bouali, M. *A study of railway ERTMS safety with Colored Petri Nets*, "The European Safety and Reliability Conference (ESREL'09), Prague: Czech Republic (2009)".

[2] Baranyi, E., Szabo, G., Racz, G. *Traffic and interlockings simulation in railway operation: theory and practical solutions*, PERIODICA POLYTECHNICA SER. TRANSP. ENG. VOL. 33, NO. 1–2, PP. 177–185 (2005).

[3] Embrey, D. *Qualitative and quantitative evaluation of human error in risk assessment*, (pp.151-201), Chapter 8, Human Factors for Engineers, Edited by Carl Sandom and Roger S. Harvey, Published by The Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom, First edition © 2004 The Institution of Electrical Engineers, ISBN (13 digit) 978-0-86341-329-2.

[4] Kraiss, K. *Advanced man-machine interaction (Fundamentals and implementation)*. Springer Berlin Heidelberg New York, ISBN-10 3-540-30618-8.

[5] Sandom, C. *Safety assessment and human factors* (PP.333-347), Chapter 14, Human Factors for Engineers, Edited by Carl Sandom and Roger S. Harvey, Published by The Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom, First edition © 2004 The Institution of Electrical Engineers, ISBN (13 digit) 978-0-86341-329-2.

[6] Meyer zu Hörste, M. & Schnieder, E. 1999. *Formal modeling and simulation of train control systems using Petri nets*, FM'99 — Formal Methods, ISBN 978-3-540-66588-5.