

ДИНАМИЧНО МОДЕЛИРАНЕ НА РАЗВИТИЕ НА СЪБИТИЯ С ПОВИШЕН РИСК ПРИ КАЦАНЕ НА ВЪЗДУХОПЛАВАТЕЛНО СРЕДСТВО В РЕЖИМ „2-РИ КРЪГ“

Павел Пенев¹, Светлозар Асенов²

¹Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките

²Българско астронавтическо дружество – клон Пловдив
e-mail: spsbyte@space.bas.bg; bad_plovdiv2015@abv.bg

Ключови думи: събития с повишен риск, авиационни произшествия, самолети, опасности

Резюме: В авиационната безопасност класическата теория на надеждността изисква да се извърши и приложи вероятностен анализ на функциониране на отделните елементи. В настояще време се препоръчва за прилагане идеологията за нов, проактивен подход за управление на риска, като показател за опасностите в системи с редки рискови събития.

DYNAMIC MODELING OF EVENTS INCREASED RISK IN LANDING OF AIRCRAFT IN 2-ROUND MODE

Pavel Penev¹, Svetlozar Asenov²

¹Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences

²Bulgarian Astronautical Society – Plovdiv Branch
e-mail: spsbyte@space.bas.bg; bad_plovdiv2015@abv.bg

Keywords: high-risk events, aviation accidents, airplanes, hazards

Abstract: In aviation safety, the classical theory of reliability requires that a probabilistic analysis of the functioning of the individual elements be performed and applied. It is now recommended to apply the ideology of a new, proactive approach to risk management as an indicator of hazards in systems with rare risk events.

Въведение

В процеса на захода за кацане на въздухоплавателно средство (ВС) в редица ситуации на навигационната, включително метеорологичната обстановка, се налага след прелитане над пистата за излитане и кацане (ПИК) на летището изпълнение на маньовър за преминаване на втори кръг. Това се осъществява на т. н. „височина на вземане на решение“ чрез използване на съответния режим на навигационния комплекс на ВС. Факторите, от които зависи височината на вземане на решение за преминаване на втори кръг, са от различен физически характер (визуален контакт с ориентири и ПИК, положение на ВС в пространството и др.) и са свързани със събития с повишен риск [5].

Процедурата за управление на полета на ВС в режим „Минаване на 2-ри кръг“ при кацане е описана в редица документи за различните типове ВС и е регламентирано в документите за летателна експлоатация. Така например, във FCOM (Flight Crew Operations Manual) са представени всички методически и технически средства, необходими за обучението на персонала от различни специалности. Въпреки това, оценявано по критериите на риска на ICAO (International Civil Aviation Organization) [10], нивото на авиационна безопасност в този режим на полета не е достатъчно високо [3]. Това е свидетелство за наличие на определени проблеми при изпълнението на този режим на полета на ВС. Документите на ICAO посочват възможните фактори за опасности, които са от ключово значение при реалните сценарии на развитие на

събитията. Посочва се необходимостта от отделното разглеждане на първостепенните въпроси, отнасящи се до повишаване на авиационната безопасност и усъвършенстване на процедурите на взаимодействие на летателните екипажи със службите за Ръководство на въздушното движение (РВД) при полети на ВС в режим „2-ри кръг“ при кацане.

За решаване на посочените проблеми могат да бъдат използвани методи на динамичното моделиране по способи, препоръчани от ACAST (European Commercial Aviation Safety Team) [9], предназначени за идентифициране на опасностите и рисковете за възникване на неблагоприятни последици (злополуки) в „дървото на сценариите“ за последователността на протичане на събитията в полет, свързани с отклонение на параметрите на реалната технология (протокол, процедура) на управление на ВС от номиналната (стандартно препоръчана от конструктора).

Препоръчваният метод за динамично моделиране може да бъде приложен за изследване с помощта на инструментариума на FMEA (Failure Mode and Effects Analyses) [1]. При анализа на дървото на събитията [7] се извършва оценка на критичността на резултатите по нивото на риска (опасността) и след като се отчетат препоръките и на другите документи на ИКАО [7,10].

В настоящия материал се извършва анализ на правилата за проверка на условията за съществуване на функционалните свойства на изследваните процеси в препоръчаните технологии (процедури) за управление на ВС. Използват се подходи във вид на точна или размита логика без вероятностни показатели. Последното е приложимо с достатъчна степен на достоверност, ако изследваните системи могат да се считат за високонадеждни [1,7], в смисъла на класическата теория на надеждността [1].

1. Постановка на задачата

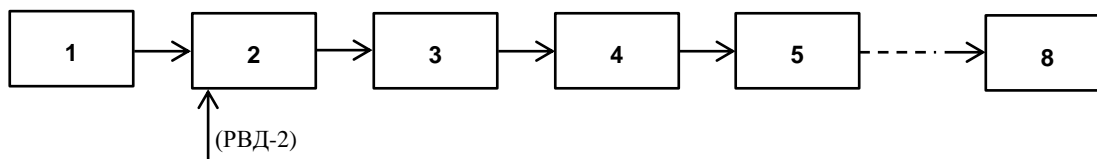
На основата на анализа [3] могат да бъдат определени две основни категории опасни фактори, определяни с методите на динамичното моделиране за ситуации LOC-I/CFIT (Loss Of Control In-flight/Controlled Flight Into Terrain) [7]:

- категория № 1- отклонение от установените схеми под формата на неизпълнение на подадените от РВД команди и възникване на временни забавяния при изпълнение на процедурите;
- категория № 2- недостатъчен професионализъм и допускане на грешки от служители на РВД.

Като се има предвид изложеното, може да бъде изработена типова схема на множество модули за последователността на смяна на дискретните състояния на системата за управление на ВС от типа на В-737 по достъпна в мрежата информация [4].

Типовата (хипотетична) схема за възникване на различни събития при функциониране на сложната транспортна система „Екипаж – ВС – Външна среда – РВД“ е показана на фиг. 1 с разшифроване на същността на работните операции при типовите протоколи за управление на ВС с използване на модули от процедури и команди с номера от 1 до 8.

В съставения модел се приема, че е налице схема от последователно свързване на няколко функционални звена – елементи на надеждността, осигуряващи функциите на цялата верига за постигане на стандартен благополучен изход от полета.



Фиг. 1. Типова схема на технология за управление на полета на ВС в режим „2-ри кръг“

Посочената типова схема е съставена съгласно FCOM (Boeing 737 Flight Crew Operations Manual) [10]. Един от важните модули е № 4, който определя вида управление на ВС с използване на инструментариум от вида:

- (1) $\langle \alpha_1 - \text{автопилот } \text{№}1; \alpha_2 - \text{автопилот } \text{№}2; \beta - \text{ръчно управление} \rangle$.

Цялата верига модули на фиг.1 определя сценарий на полета по стандартна процедура, съгласно FCOM. Но в полет е възможно да възникнат отклонения от типовите процедури. При това, в FCOM за самолет В-737 са изброени възможните изменения в сценария на полета и са посочени последици, които могат да възникнат при неизпълнение на стандартните процедури от схемата на фиг.1.

От схемата се вижда, че дадената верига се състои от физически последователно свързани функционални елементи e_i , принадлежащи на ограниченото множество $E (e_i \in E)$, което от своя страна показва, че множество E е точно подмножество. Поради това, може да бъде прието за универсално множество на физически функционални елементи на системата със своите точни признаци. Приема се, че на всяко $e_i \in E$ на фиг.1 съответства дискретно състояние $q_i \in E$, което с методите на точната логика описва същността на състоянията чрез логически променливи от вида: „0“ – „функционира“, „1“ – „функционален отказ“. Това може да бъде записано по следния начин:

$$(2) \quad e_i \in E \Rightarrow q_j(i) \in Q \rightarrow \{L_k\} \Rightarrow H_k,$$

където (\Rightarrow) – „следствие“, L_k – веригата състояния в моделите на динамическо моделиране; H_k – загубата, или „цената“ на риска.

При идентификация на опасностите по ACAST [9] с помощта на моделите на динамично моделиране се предлага да бъде приложен предикативния метод, посочен в Annex-19 на ICAO [7,10], за определяне на критичността на отделните пътища в различните сценарии, водещи до авиационни произшествия. За да се постигне това е необходимо да се определят някои рискови събития и в схемата на фиг.1 да се посочат точките на възможни разклонения (преходи) на технологичния процес с възможните негативни последствия. Понятието за авиационна безопасност ще бъде разглеждано съгласно изискванията на Annex-19 [2,4], като състояние на авиационната система с приемливи рискове за възникване на опасности. Очевидно е, че не са известни вероятностите за възникване на редките рискови събития в отделните авиационни произшествия. Но при методите за динамично моделиране това няма значение, тъй като чрез размера на загубата (стойността на щетата) лесно се определя цената на риска в размитите множества на състоянията $\{q_i\}$ от Q [1,8].

2. Определяне на нивото на функционалност на системата

В съответствие с формулираната задача е необходимо да бъдат определени веригите от събития, образуващи пътища до критически събития. Вижда се, че прогнозният физически резултат на типа авиационно произшествие със сериозни последствия зависи само от последователността (реда и последователните номера) на сменящите се събития. Вероятността за такива критически събития няма значение в единичните (конкретни) опити по изпитване на системите с висока надеждност.

Надеждността на системите не е еквивалентна на нивото на функционалност, доколкото нивото на надеждност зависи от степента на резервиране. В същото време качеството на функциониране не зависи от броя на функционалните връзки в системата [7].

Във всеки модул на схемата на фиг.1 съществуват вътрешни връзки и елементи на надеждността, които могат да бъдат разглеждани като физически ключове (изключватели), които пропускат или задържат сигнали $q_i \in E$.

На фиг.1 са показани 8 отделни елементи от типа $q_i \in E$ от зададеното множество E . Очевидно е, че системата като цяло функционира, ако всички елементи работят, т.е. една система със зададена функционална технология, като цяло, „не отказва“, докато има елементи със свободни (ненатоварени) функционални връзки. При това, функцията на работоспособност Φ и уравнението на функционалност на всички $q_i \in E$ на фиг.1 в логическа форма (в полето на точната логика) може да бъде зададена като функция на логическата алгебра:

$$(3) \quad \Phi(q_{j1}, q_{j2}, \dots, q_{jm} | \Sigma_0) = \bigvee_{r2} \bigwedge_{jr1} q_{jr1(r2)},$$

където Σ_0 са условията, при които започва и успешно завършва процедурата „2-ри кръг“; \bigvee_{r2} е дизюнкция на конюнкцията; \bigwedge_{jr1} е конюнкция на признаците на състоянията, характеризиращи последователността за функциониране на елементите.

Схемата показва, че отделните елементи са последователно съединени, поради което отказ в което и да е звено означава прекъсване на технологичната верига. Съгласно авиационните стандарти за FCOM [2,4,10], не са допустими никакви случайни прекъсвания във функционирането на всеки от елементите. Само в такъв случай се осигурява необходимото ниво на безопасност на системата. Поради тази причина, полет с отклонения в режим „2-ри кръг“ трябва да бъде прекратяван във всяка неразчетна точка с преминаване по напълно определен способ в резервен режим за да не бъде допуснато авиационно произшествие.

В същото време, в FCOM са посочени критичните елементи: това са $e_4(q_4), e_5(q_5), e_6(q_6)$ и др. при това e_4 и q_{4j} представляват управлението на полета на ВС с помощта на автопилота или ръчно управление. Само в този случай се извършва преход в състояние e_5 и q_5, e_6 и q_6 и т.н. Съгласно FCOM в тези състояния е възможно да възникне допустимо, но опасно разклоняване на процеса (което на схемата на фиг.1 не е показано, но е посочено в FCOM). Като се отчитат тези обстоятелства могат да бъдат намерени разклонения в технологичния процес на схемата на фиг.1. Тук могат да възникнат алтернативни линии, водещи или към „стандартно приземяване“, или „към авиационно произшествие“. По-горе в (1) беше посочено, че съгласно FCOM самолет В-737 разполага с два автопилота и резервен режим за управление с щурвал (ръчно управление). На това основание, изходният резултат за критичния момент № 4 на схемата на фиг.1 може да бъде представен в конкретна логическа форма с помощта на логическата променлива γ , задаваща функцията на логическата алгебра чрез $q_j(i) \in Q$:

$$(4) \quad q_0 = \alpha_1 \wedge \alpha_2 \wedge \beta; \quad q_1 = \bar{\alpha}_1 \wedge \alpha_2 \wedge \beta; \quad q_2 = \alpha_1 \wedge \bar{\alpha}_2 \wedge \beta; \quad q_3 = \bar{\alpha}_1 \wedge \bar{\alpha}_2 \wedge \beta;$$

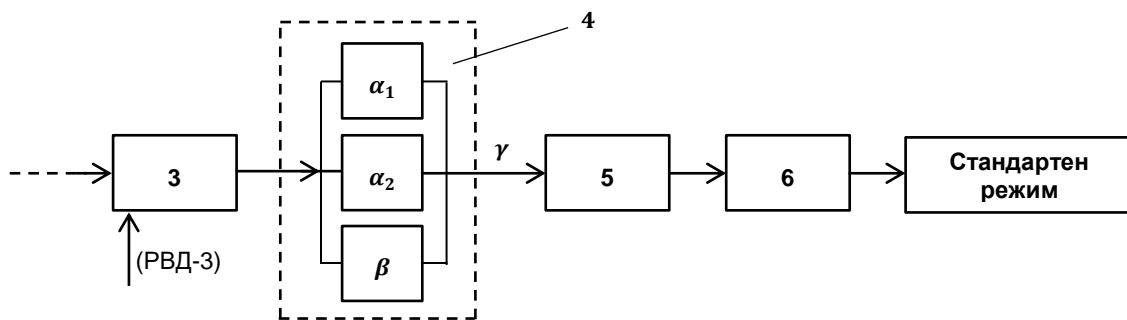
$$q_4 = \alpha_1 \wedge \alpha_2 \wedge \bar{\beta}; \quad q_5 = \bar{\alpha}_1 \wedge \alpha_2 \wedge \bar{\beta}; \quad q_6 = \alpha_1 \wedge \bar{\alpha}_2 \wedge \bar{\beta}.$$

Функцията на логическата алгебра γ за множеството алтернативи ще има вида:

$$(5) \quad \gamma = \Phi(\vee q_i) = \Phi(\alpha_1 \wedge \alpha_2 \wedge \beta) \vee (\bar{\alpha}_1 \wedge \bar{\alpha}_2 \wedge \beta),$$

където знакът ($\bar{\dots}$) представлява отрицание на функционалността.

Като се използва (4) и инструментариума в (1) може да бъде построена сложна структурна схема на елемента на надеждност e_4 с излишък на функционалност. Възможни са осем комбинации, което определя стойността на вероятностния показател на надеждност (работоспособност). Такава схема е представена на фиг. 2.



Фиг. 2 . Схема на свързване на елементите на надеждност в модул 4

От друга страна, представеният излишък на функционалност няма отношение към показателя на безопасност, тъй като съгласно методологията на ICAO всеки показател на авиационна безопасност винаги се определя чрез последствията на отказите. Изходният логически резултат на фиг.2, дефиниран като изходна логическа променлива γ от модул 4 (фиг. 1) с инструментариума (1) във вида „ γ “ = „има функция, сигналът преминава“, ще има следният вид като функция на логическата алгебра:

$$(6) \quad \gamma = (\alpha_1 \wedge \bar{\alpha}_2) \vee (\bar{\alpha}_1 \wedge \alpha_2) \vee (\bar{\alpha}_1 \wedge \bar{\alpha}_2) \vee \beta \Rightarrow \gamma = 0 \text{ („няма отказ“);}$$

$$\gamma = (\bar{\alpha}_1 \wedge \bar{\alpha}_2) \wedge \bar{\beta} = 1 \text{ (пълен функционален отказ на } e_4),$$

където \wedge е знак за конюнкция; \vee - за дизюнкция; ($\bar{\dots}$) - отрицание.

Както е известно, с помощта на такива схеми традиционно се оценява вероятността за съществуване на дадено състояние. Но от така формулираната задача следва, че от това няма никакъв смисъл, тъй като основната цел в конкретната схема е проактивно да се определи само физическия резултат от вида: „има отказ“ или „няма отказ“ („функционира“).

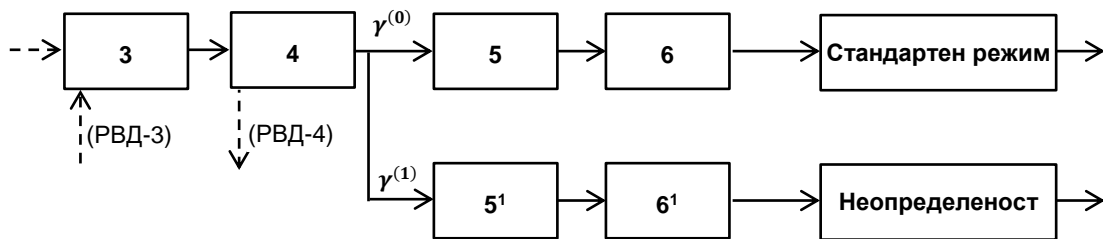
Както беше отбелязано по-горе, излишък от този вид повишава надеждността, но по никакъв начин не влияе върху качеството на функциониране. Поради това, от схемата на фиг.1 следва, че („рано или късно“) може да възникне отказ на целия функционален елемент e_4 . В този случай трябва да разглеждаме само два варианта на функциониране от типа: „сигналът протича“ (няма отказ) или „сигналът не протича“ (отказ).

От това следва, че структурата на функционалния елемент с излишък e_4 на фиг.2 може да бъде опростена. Съгласно теоремата на Де Морган, функционалната схема на фиг.1 може да

бъде преобразувана с помощта на функциите на логическата алгебра. Като бъде отчетено свойството идемпотентност на логическите елементи $e_i, q_j(i)$. След преобразувания по теоремата на Де Морган ще получим израза [8]:

$$(7) \quad \gamma = (\gamma^{(0)}, \gamma^{(1)}): \gamma^{(0)} = 0 - \text{норма}; \gamma^{(1)} = 1 - \text{"отказ"}.$$

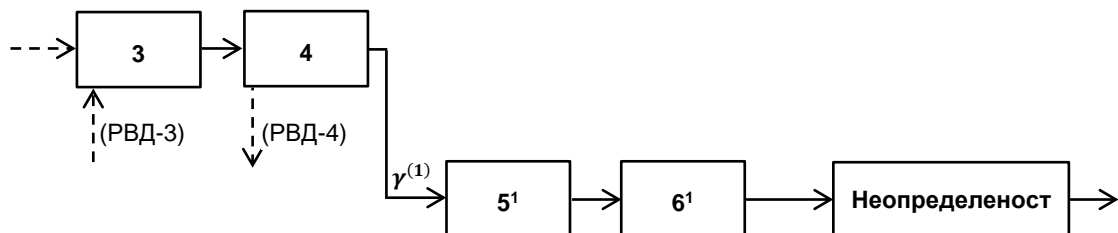
Като резултат, след използване на (5) и (6) модул 4 (схемата на фиг.1) от формата на фиг.2 се преобразува в разклонената схема, показана на фиг. 3.



Фиг. 3. Еквивалентна схема за управление „извън стандарта“ с разклонения в модул

Физически $\gamma^{(1)} = 1$ в (5) означава липсата (отсъствие) на пилотиране на ВС, т.е. несработване на модул 4 от схемата на фиг.1. От това следва, че е открита точка на непредвидено разклоняване на процеса. Това представлява системна грешка в стандартната технология (протокол) на процеса на кацане при отказ на двата автопилота на ВС. Системната грешка е в резултат на негативното последствие на Човешкия фактор, под формата на „отказ“ на Командира на ВС да (изключи автопилота и да) премине към ръчно управление (т.е. към β , по правилата на схемите на фиг.1 и фиг.2).

Реалната схема на технологията за управление на ВС има вида, първоначално представен с разклонението на фиг.3 и е показана последователността на събитията към авиационното произшествие, преминавайки през модул 4 на фиг. 4.



Фиг. 4. Вариант на неприложено ръчно управление при кацане на ВС в режим „2-ри кръг“

Технологичната схема на фиг.4 съвпада с версията за катастрофата на 17.11.2014 г. на самолет Boeing 737 на международното летище на гр. Казан, Руската федерация [4].

Подобен анализ може да бъде извършен и на другите модули от стандартната схема на фиг.1, ако бъде налична достоверна информация от FCOM (Boeing 737). Стойностите на нивото на риска могат да бъдат намерени с помощта на матрицата на NASA (National Aeronautics and Space Administration) за оценка на риска [3,7,9].

Получените резултати също така показват, че съществено понижаване на риска от авиационни произшествия не може да бъде постигнато без активна, широка и функционална намеса на РВД в процеса на контрол на полета. Така например, възможното проактивно управляващо въздействие U_4 в модул 4, съгласно препоръките на ICAO и NASA, може да бъде намерено в кода на състоянието на този модул:

$$(8) \quad U_4 = f(d(\gamma^{(1)})),$$

където $d(\gamma^{(1)})$ е кодът на функционалното състояние на модул e_4 по булевата променлива $(\gamma^{(1)})$, която в дадената технология определя („разрешава“, за съжаление) недопустимото, съгласно процедурата за функциониране и по изискванията за авиационната безопасност, критично разклоняване на процеса „ръчно управление“ в приетата технологична схема „2-ри кръг“.

Смисълът на предикативното управление U_4 , установено при анализа на системните грешки в технологията „2-ри кръг“ за дадения тип ВС, се състои в необходимостта от прекъсване на първично регламентираната процедура за преминаване на „2-ри кръг“ и за привеждане на неконтролируемия опасен полет на ВС в резервния безопасен режим. Този режим трябва да бъде предвиден (*проектиран и конструиран*) предварително в схемата на фиг.1.

Необходимото управление U_4 се състои в предварително модифициране на цялата технология (процедура) за управление на ВС, чрез прилагане на функциите на модул e_4 по „код $d(\gamma^{(1)})$ “, който автоматично се формира на борда на ВС при новата зададена типова технология, съгласно FCOM. Този код също така може автоматично да бъде предаден в (изпратен на) стационарната (на земята) част на системата за РВД по канала за вторична радиолокация. При това се създава възможност екипажите от РВД своевременно да се намесят в работата на екипажа на ВС. Резервни канали за подобни операции могат да бъдат намерени, ако бъде използвана системата за авиационни комуникации от типа “ACARS-380” [6]. Така трябва да се отбележи, че информационното поле на „черните кутии“ на ВС от типа на В-737 е толкова обширно и съдържа достатъчно „свободни“ (неангажирани) области, че не е сложно да бъдат намерени още няколко канала за връзка за осъществяване на допълнителни резервни операции със системата за РВД.

Заклучение

Представена е схема за оценка на авиационната безопасност [7] в рамките на методологията на размитите множества (Fuzzy Sets) на основата на анализа на физическите възможности за съществуване в системите от функционални свойства (функционалност на каналите за обработване и пропускане на сигналите по линиите за връзка на всички процедури от стандартната технология за управление на полета на ВС). За тази цел не е необходимо използването на вероятностен анализ и показатели за безотказност на отделните елементи. Необходимо е само да се извърши анализ на функционалните свойства на комплекса и интегрираните подсистеми на ВС. На практика, това представлява идеологията за управление на риска, който е показател за опасностите в системите с редки рискови събития.

Препоръките на Annex-19 за прилагане на нов подход към управление на риска по способите „проактивни“ и „предикативни“ процедури очевидно са много по-ефективни от преди прилаганите процедури. В този случай, без прилагане на вероятностен анализ на безопасността, както това е прието в класическата теория на надеждността, може точно, т.е. без неопределеност, да се определят „възловите критически елементи“ (в които може да протече разклоняване на технологичната верига) в протоколите за управление на полета на ВС, построени в рамките на точната логика.

Литература:

1. Загорски, Н., Външната среда – основен елемент при декомпозиция на модела 5xM за причините за авиационни произшествия, Ninth Scientific Conference with International Participation SPACE, ECOLOGY, SAFETY SES 2013.
2. Загорски, Н., Човешкият фактор – основен елемент при декомпозиция на модела 5xM за причините за авиационни произшествия, Ninth Scientific Conference with International Participation SPACE, ECOLOGY, SAFETY SES 2013.
3. Информация по съвещанию в Брюсселе по факторам риска в отношении безопасности полетов «При уходе на второй круг» в 2013 г. Брюссель. [Электронный ресурс].: <http://shpls.org/labour-2/safe-aviation/1508-aevt-2013-835zapiska-gn-matveeva-ob-analize-mirovoj-praktiki-intsidentov-pri-ukhode-na-vtoroj-krug>
4. Катастрофа ВС Boeing 737-500 (53A), с държавен и регистрационен знак VQ-BBN (Бермуда), Експлоатант: ОАО „Авиокомпания „Татарстан“- Руска федерация. [Електронен ресурс]. <https://mak-iac.org/rassledovaniya/17-noyabrya-boing-737-500-vq-bbn/>
5. Певев, П., Недялков, Д. Справочник по тактическа навигация. С., ВИ, 2000.
6. De Florio Filippo. Airworthiness. An Introduction to Aircraft Certification and Operations. Third Edition. 2016. Elsevier Ltd. Oxford OXS 1GB, United Kingdom.
7. Doc. 9859, AN/474. Safety Management Manual (SMM). Second Edition. 2009. [Електронен ресурс]. https://www.icao.int/safety/fsix/Library/DOC_9859_FULL_EN.pdf
8. Flynn, Ed (1995). Understanding ACARS – Aircraft Communications Addressing and Reporting System (3rd edition) [Електронен ресурс] https://openlibrary.org/books/OL12145382M/Understanding_Acars
9. IATA Controlled Flight Into Terrain Accident Analysis Report 2008-2017 Data 2018 Edition, [Електронен ресурс]. <https://www.iata.org/contentassets/06377898f60c46028a4dd38f13f979ad/cfit-report.pdf>
10. 737-8/-9. Flight Crew Operations Manual. The Boeing Company. [Електронен ресурс]. <http://www.b737.org.uk/fcom.htm>