

Подходы к оценке надежности эрготехнических звеньев авиатранспортных систем уровня воздушного судна

В.З. Чоккой

Иркутский филиал Московского государственного технического университета гражданской авиации,
ул. 1-я Советская 139, Иркутск, Россия
chiokov@mail.ru

Статья поступила 15.06.2016, принята 21.08.2016

Показана актуальность многоаспектной оперативной оценки надежности системы межполетной подготовки современных воздушных судов гражданской авиации. Рассмотрены подходы к комплексной оценке надежности эрготехнических звеньев уровня отдельного воздушного судна, а также подходы к оценке надежности таких компонент звеньев, как бортовые системы и оборудование; бортовые средства регистрации отказов; операторы, выполняющие диагностику и локализацию отказов; операторы, осуществляющие устранение отказов и выполнение планового межполетного обслуживания. В качестве основного показателя надежности использован коэффициент оперативной готовности, учитывающий вероятность безотказной работы, и коэффициент готовности звена к применению по назначению. Для расчета коэффициента оперативной готовности предложено несколько подходов: традиционный подход на основе сочетаний анализа структурной схемы и параметрической оценки безотказности элементов структурной схемы, когда традиционные решения расширены с учетом резервирования и режимов контроля работоспособности эргатических элементов; подход на основе анализа графа функционирования с использованием общего метода Кирхгофа для проводимости сетей и правила Мэсона для ориентированных сетей с обратной связью (с циклами); подход на основе анализа предельных производственных возможностей (производительности) эргатических элементов эрготехнического звена. Показаны возможность и целесообразность использования перечисленных подходов для оценки надежности как отдельных технических и эргатических элементов, так и различных связей (сочетаний) таких элементов при управлении технологическими процессами в транспортных системах.

Отдельные решения по оперативной оценке надежности эрготехнических звеньев реализованы в виде программных модулей, рекомендуемых для использования на автоматизированных рабочих местах авиадиспетчеров, контролирующих обслуживание воздушных судов в аэропортах.

Ключевые слова: надежность; оценка надежности; межполетное обслуживание; технический элемент; эргатический элемент; эрготехническое звено.

Approaches to the reliability assessment for human-machine links in air transport level systems of the aircraft

V.Z. Chokoj

Moscow State Technical University of Civil Aviation, Irkutsk branch; 139, 1st Sovetskaya St., Irkutsk, Russia
chiokov@mail.ru

Received 15.06.2016, accepted 21.08.2016

Relevance has been shown for a multidimensional operational assessment of reliability in the system of interflight preparation of modern aerial vehicles of civil aviation. Approaches have been considered both to a complex assessment of reliability for human-machine level links of an aerial vehicle and to the reliability assessment for such a link components as onboard systems and equipment; onboard means of fault record; operators, carrying out diagnostics and localization of faults; operators, performing fault resolution and routine interflight maintenance. Coefficient of operational readiness, considering the probability of no-fault operation, and coefficient of link readiness to application to destination have been use as the main indicator of reliability. To find out the coefficient of operational readiness, several approaches have been offered. The first is a traditional one, based on the combinations of the analysis of the block diagram and a parametrical assessment of non-failure operation of elements of the block diagram. Traditional decisions are expanded, considering reservation and verification regimes of operability of conversational elements. The second is the approach, based on the analysis of the functioning chart with the use of a common Kirchhoff method for network conductivity and Mezon's rule for the oriented networks with feedback (with cycles). The third approach is based on the limiting analysis of production capabilities (performance) of conversational elements of a human-machine link. An opportunity and feasibility of use of the approaches have been shown for the reliability assessment of both technical and conversational elements and various links (combinations) of such elements in case of technical process management in in transport systems.

Some decisions on operational reliability assessment for human-machine links have been realized in the form of the program modules, recommended for the use on the automated workplaces for air traffic control officers, controlling servicing of aerial vehicles at the airports.

Key words: reliability; reliability assessment; interflight service; technical element; conversational technique; human-machine link.

Введение

Сложившиеся экономические условия потребовали от отечественных авиакомпаний существенной интенсификации летной эксплуатации ограниченного парка современных воздушных судов, что предполагает частые, ограниченные по времени и технологически сложные межполетные подготовки. Основу межполетного (оперативного) обслуживания, наряду с плановым обслуживанием, составляют диагностика бортового оборудования и устранение отказов. В настоящее время при межполетном обслуживании выявляется и устраняется 26,4 % отказов, а также устраняется 29,2 % отказов, выявленных на различных фазах предыдущего полета.

Часто этап межполетной диагностики и устранения отказов непосредственно определяет время обслуживания воздушного судна (ВС) и сказывается на регулярности и безопасности полетов. В этой связи оправданы рост требований к авиационным системам оперативной диагностики, а также востребованность исследований, направленных на повышение их эффективности.

В силу ответственности, сложности организации и стохастичности процессов функционирования диагностические системы в обычно выполняются в человеко-машинном (эрготехническом) варианте, сочетающем технические элементы (например бортовые средства контроля) и эргатические элементы (например, экипаж, обслуживающий авиационный персонал). Каждую такую систему можно понимать как совокупность взаимодействующих связей элементов — эрготехнических звеньев (ЭТЗ).

Ниже рассматриваются подходы к оценке надежности ЭТЗ, реализующих оперативную диагностику отдельного ВС. Получаемые оценки надежности предполагается использовать при управлении процессами оперативного обслуживания ВС.

Основные понятия и постановка задачи исследования. Надежность — свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять

требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, ремонта, хранения и транспортирования. Данное стандартизованное определение имеет весьма общий характер и трудноприменимо по отношению к ЭТЗ, поэтому далее дополнительно рассматриваются понятия функциональной, производственной и производительной надежности.

Функциональная надежность — вероятность (готовность) к безотказной работе в течение определенного (межполетного) периода с учетом весомости (последствий) возможных отказов.

Производственная надежность отличается от функциональной надежности тем, что, помимо отказов (потери работоспособности), возможны сбои (кратковременные самоустраняющиеся отказы), обесценивающие, в смысле итога межполетного обслуживания, последующее восстановление элементом своей работоспособности.

Производительная надежность учитывает безотказность как один из аспектов производительности ЭТЗ, рассматриваемый как одноканальная система массового обслуживания (СМО), обрабатывающая поток заявок на межполетное обслуживание воздушных судов.

Для количественной оценки перечисленных аспектов надежности используются вероятность безотказной работы за задаваемое время и показатель оперативной готовности — вероятности того, что ЭТЗ или его элемент будет работоспособен в произвольный момент времени t и безотказно проработает заданное время t_3 :

$$K_{ор} = P(t_3) \cdot K_r(t),$$

где $K_r(t)$ — функция готовности, вероятности того, что в момент времени t ЭТЗ работоспособен.

Несмотря на разнообразие типов ВС, составляющих парк современных ВС, и разнообразие используемых диагностических систем, в самом общем случае можно указать некую обобщенную структурно-логическую схему выделенного класса ЭТЗ. Такая схема, применительно к современным ВС, представлена на рис. 1.

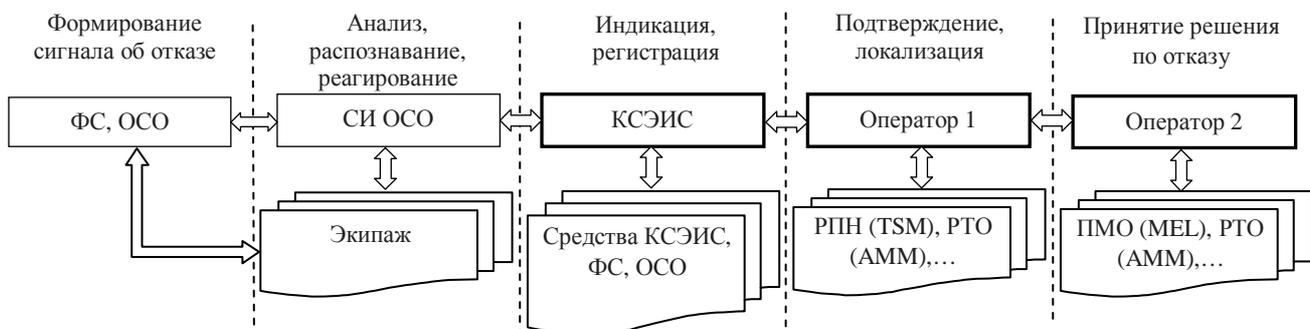


Рис. 1. Структурно-логическая схема диагностического ЭТЗ уровня ВС (элементы звена выделены)

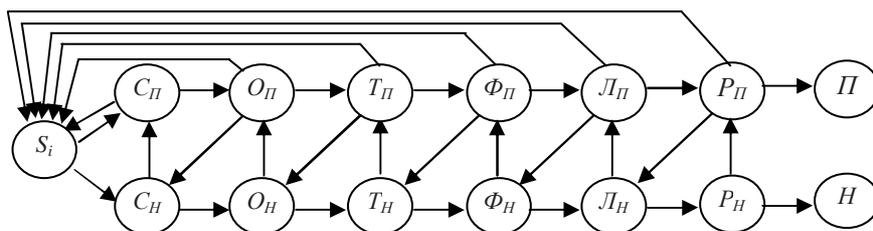


Рис. 2. Граф возможных исходов межполетной диагностики при наличии отказа

На рис. 1 аббревиатуры означают: ФС — функциональные системы; ОСО — общесамолетное оборудование; СИ ОСО — система интеграции ОСО; КСЭИС — комплексная система электронной индикации и сигнализации; РПН — руководство по поиску неисправностей; TSM — Trouble Shooting Manual; PTO — руководство по техническому обслуживанию; АММ — Aircraft Maintenance Manual; ПМО — перечень минимального оборудования; MEL — Minimum Equipment List.

В соответствии со структурно логической схемой в полете параметрическая или дискретная информация об отказе поступает в СИ ОСО, где формируются ответный управляющий сигнал и сигнал для КСЭИС, которая транслирует поступивший сигнал на кабинные средства индикации и в систему регистрации полетной информации. При наличии на борту системы ACARS (Aircraft Communications Addressing and Reporting System) информация о существенных отказах передается наземным станциям.

При межполетной подготовке оператор 1 (специалист, контролирующей работоспособность ФС и ОСО) изучает послеполетную информацию КСЭИС и других регистраторов, устные сообщения экипажа и записи в бортовых журналах, после чего формулирует отказ и выполняет процедуры подтверждения отказа и локализации подтвержденного отказа.

На завершающем этапе межполетной подготовки оператор 2 (специалист, принимающий решение по выявленному отказу) формулирует локализованный отказ и, используя нормативную документацию, принимает решение по отказу (например, безусловное устранение, отложенное устранение при ряде условий, безусловное отложенное устранение).

Рассмотренные замечания позволяют сопоставить структурно-логическую схему ЭЗТ и граф возможных исходов межполетной диагностики ВС (рис. 2). На рис. 2 использованы обозначения: Si — отказ i-ой подсистемы ФС или ОСО; П — правильный итог обработки отказа; Н — ошибочный итог обработки отказа; С — сбор первичной информации об отказе (экипаж, бортовой журнал); О — изучение послеполетных отчетов; Т — тестирование для подтверждения отказа; Ф — формулирование отказа перед его локализацией; Л — локализация отказавшего элемента в i-ой подсистеме ФС или ОСО; Р — принятие решения по локализованному отказу. Индексы П и Н при перечисленных символах обозначают соответственно правильное и ошибочное выполнение текущей операции. Состояния ЭЗТ представлены узлами, а переходы между состояниями — ребрами графа.

Из графа следует, что в нем на всех промежуточных этапах возможны как «правильные», так и «ошибочные» переходы, «заморозка» процесса диагностирования, а также переход из «ошибочной» ветви на «правильную» ветвь. Различные аномалии в работе ЭЗТ на графе представлены циклами.

Представленные материалы позволяют предполагать, что оценку надежности ЭЗТ можно выполнять с использованием двух подходов — путем рассмотрения структурной схемы надежности ЭЗТ (формируемой на основе рис. 1) и путем рассмотрения графа функционирования ЭЗТ (формируемого на основе рис. 2).

Оценка надежности по структурной схеме надежности ЭЗТ. В общем виде структурная схема надежности (СШ) рассматриваемого класса ЭЗТ представляет трехэлементную последовательность без резервирования, включающую технический элемент 1 и эргатические элементы 2 и 3 (рис. 3). Все элементы восстанавливаемые. Элемент 1 — с условно непрерывным (короткопериодическим) контролем технического состояния и периодическим обслуживанием, элементы 2 и 3 — с периодическим контролем состояния и периодическим обслуживанием. Элементы 1 и 2 образуют сложный (составной) элемент. Функционирование элементов понимается как последовательность чередующихся интервалов работоспособности и отказа, оцениваемых соответственно средней наработкой на отказ T и средним временем восстановления τ .

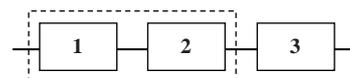


Рис. 3. СШ диагностического ЭЗТ

В качестве основного показателя надежности элемента далее принят коэффициент оперативной готовности $Kog(t_0)$, рассчитываемый как произведение коэффициента готовности $Kg(t_0)$ и вероятности безотказной работы $P(t_0)$, где t_0 — задаваемое время межполетного обслуживания.

Параметрическая оценка $P(t)$ при актуальных для ЭЗТ законах распределения T может быть выполнена с использованием следующих зависимостей:

– при экспоненциальном распределении:

$$P(t) = \exp(-\lambda \cdot t); \tag{1}$$

– при гамма-распределении:

$$P(t) = \int_0^t \left[\frac{a^b \cdot t^{b-1} \cdot \exp(-a \cdot t)}{\Gamma(b)} \right] \cdot dt; \tag{2}$$

– при распределении Вейбулла:

$$P(t) = \exp\left[-\frac{1}{a} \cdot t^b\right]; \quad (3)$$

– при DN-распределении:

$$P(t) = \Phi\left(\frac{\mu-t}{v\sqrt{\mu\cdot t}}\right) - \exp\left(\frac{2}{v^2}\right) \cdot \Phi\left(-\frac{\mu+t}{v\sqrt{\mu\cdot t}}\right), \quad (4)$$

где λ , a , b , μ , v — параметры соответствующих законов распределения; $\Gamma(\cdot)$ — гамма-функция.

Тогда при K_{Γ} , рассчитываемом как:

$$K_{\Gamma} = T/T + \tau, \quad (5)$$

значение $\text{Kог}(t_0)$ при произвольном законе распределения T и может быть определено по формуле:

$$K_{\text{ог}}(t_0) = K_{\Gamma} \int_{t_0}^{\infty} P(t) \cdot dt. \quad (6)$$

Рассмотрим ситуацию, когда эргатический элемент условно может быть представлен состоящим из двух частей, одна из которых контролируется непрерывно (короткопериодически), а другая — периодически. В этом случае есть вероятность латентного (скрытого, несвоевременно выявленного) отказа в течение времени $\tau_{\text{с}}$.

Тогда при произвольном законе распределения T и периодичности контроля $\tau_{\text{с}}$ коэффициент оперативной готовности $\text{Kог}(t)$ может быть рассчитан по формуле:

$$K_{\text{ог}}(t) = [1 - (0,5 \cdot \alpha \cdot \gamma_{\text{в}} + \gamma)] \cdot P(t), \quad (7)$$

где α — вероятность латентного функционального отказа элемента; $\gamma = \frac{\lambda}{\mu}$ и $\gamma_{\text{в}} = \frac{\tau_{\text{с}}}{T}$ — вспомогательные переменные; λ и μ — интенсивность отказов и интенсивность восстановления функциональности элемента.

При функционировании ЭТЗ возможен вариант, когда эргатические элементы 2 и 3 при их отказе могут быть заменены резервными специалистами. В этом случае скорректированный коэффициент готовности K'_{Γ} определяется зависимостью:

$$K'_{\Gamma} = K_{\Gamma} \cdot (1 - P), \quad (8)$$

где K_{Γ} — ранее рассмотренный коэффициент готовности; P — вероятность замены элемента, рассчитываемая при пуассоновском распределении по зависимости:

$$P = \frac{\exp(-a) \left[\sum_{j=k+2}^{\infty} (j-k-1) \frac{a^j}{j!} \right]}{a+n-2k + \exp(-a) \sum_{j=0}^k (n-k-j) \frac{a^j}{j!}} \quad (9)$$

В зависимости (9) переменные обозначают: a — вспомогательная переменная $a = \lambda \cdot T_{\text{п}}$; n — исходное количество запасных элементов; λ — интенсивность отказа элемента; $T_{\text{п}}$ — время поставки запасного элемента; k — порог начала пополнения запаса элементов $0 \leq k \leq \frac{n}{2} - 1$.

После оценки скорректированного коэффициента готовности K'_{Γ} найденное значение используется в зависимости (6) вместо K_{Γ} .

При оценке $P(t)$, применительно к схеме ЭЗТ (рис. 3), рекомендуются зависимости:

– элемент 1: для прикидочной оценки — зависимость (2), а для уточненной — (4);

– элементы 2 и 3: для прикидочной оценки — зависимость (1), а для уточненной — (3);

– составной элемент 1+2: для прикидочной оценки — зависимость (3), а для уточненной — (4);

– для всего звена — зависимость (4).

После расчета надежности отдельных элементов результирующая надежность всего ЭТЗ может быть определена по известным формулам для последовательного соединения элементов.

Оценка надежности по графу функционирования ЭТЗ. При наличии графической модели вариантов хода межполетной подготовки ВС возможна оценка ряда вероятностных показателей на основе методов топологического анализа графов [5]. Например, для произвольного размеченного графа, содержащего p путей от j -го узла до k -го узла и m циклов обратной связи, оценка вероятности хода межполетной подготовки по пути T_{jk} может быть выполнена по общему правилу:

$$T_{jk} = \frac{(P_1 + P_2 + \dots + P_p)(1-L_1)(1-L_2)\dots(1-L_m)}{(1-L_1)(1-L_2)\dots(1-L_m)}, \quad (10)$$

где P_i — вероятность передачи по i -му ребру, лежащему на пути T_{jk} ; L_s — вероятность передачи по s -му циклу обратной связи, равная произведению вероятности передачи по ребрам, составляющим этот цикл обратной связи.

Примечания

1. В числителе правила (10) должны быть представлены только те циклы обратной связи, которые не касаются узлов на пути T_{jk} .

2. В знаменателе правила (10) должны быть представлены только те циклы обратной связи, которые не касаются узлов смежных циклов обратной связи (то есть, которые не смежны друг с другом).

Построенный на основе рис. 1 и 2 размеченный граф функционирования ЭТЗ при межполетной подготовке ВС представлен на рис. 4. В графе исходный (1) и завершающие (14, 15, 16, 17) узлы соответствуют следующим ситуациям (состояниям ЭТЗ): 1 — появление сообщения об отказе ОСО или ФС; 14 — неопределенность, блокирующая выпуск ВС в полет; 15 — определенность, требующая затрат времени, превышающих длительность межполетного обслуживания; 16 — определенность, позволяющая выпуск ВС в полет; 17 — обобщенный итог обработки сообщения об отказе ОСО или ФС.

Промежуточные узлы (2...13) — это состояния ЭТЗ, соответствующие бинарным ответам (да – нет) на следующие вопросы: 2 — «сообщение принято СУ ОСО?»; 3 — «сообщение сформулировано экипажем?»; 4 — «сообщение сформулировано авиаперсоналом?»; 5 — «сообщение принято оператором 1?»; 6 — «сообщение документировано?»; 7 — «сообщение подтверждено оператором 1?»; 8 — «отказ локализован?»; 9 — «решение по локализованному отказу принято оператором 2?»; 10 — «устранение отказа без условий?»; 11 — «устранение отказа с условиями?»; 12 — «устранение отказа отложенное?»; 13 — «устранение отказа возможно в ходе межполетного обслуживания?».

«гибели – размножения». С учетом специфики межполетного обслуживания ВС предлагается рассматривать эргатическую часть ЭТЗ как одноканальную СМО, допускающую очередь заявок. Графическая модель функционирования такой СМО представлена на рис. 5. На данном рисунке приняты следующие обозначения: λ и μ — интенсивности входного и выходного потока заявок; S_0 — состояние «СМО свободна»; S_1 — состояние «СМО занята, очереди нет»; S_k, S_n — состояния «СМО занята, в очереди k-1 заявок» и «СМО занята, в очереди n-1 заявок».

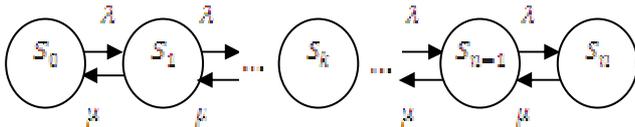


Рис. 5. Модель ЭТЗ в виде одноканальной СМО с очередями заявок

При допущениях о пуассоновском законе поступления заявок и экспоненциальном законе их обслуживания, введя обозначение $\rho = \frac{\lambda}{\mu}$, вероятность безотказной работы СМО для стационарного режима можно рассчитать как:

$$\left. \begin{aligned} P_{\text{эрг}} &= 1 - \frac{1-\rho}{(1-\rho^{n+1})\cdot\rho^n} \\ P_{\text{эрг}} &= 1 - \frac{1}{n+1} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

В выражении (15) верхняя зависимость соответствует случаю, когда $\rho \neq 1$, а нижняя — случаю $\rho = 1$. Коэффициент оперативной готовности СМО Ког эрг может быть рассчитан как произведение результатов расчета по зависимостям (5) и (15).

Заключение. Определены основные термины и общие подходы к решению задачи раздельной и общей оценки надежности технического и эргатического элементов. Совокупность таких взаимодействующих элементов рассмотрена как эрготехническое звено системы межполетного обслуживания ВС.

Предложены способы многовариантной оценки надежности ЭТЗ, в частности, на основе анализа структурной схемы — с использованием формул параметрической оценки при различных законах распределения; на основе анализа графа функционирования — с использованием формулы Мэзона; на основе анализа предельных производственных возможностей (производительности).

Все варианты оценки надежности доведены до прикладного уровня в виде программных компонент для ЭВМ. Данные компоненты интегрированы в авторский пакет специального программного обеспечения Модельер 2.2, используемый в образовательном процессе ИФ МГТУ ГА по направлению подготовки 25.03.01 и рекомендуемый для управления межполетной подготовкой современных ВС в эксплуатирующих организациях гражданской авиации.

Литература

1. Величко И.И., Чокоей В.З. Надежность и техническая диагностика авиационной техники. Иркутск: ИВАИИ (воен. ин-т), 2006. 187 с.
2. Далецкий С.В. Формирование эксплуатационно-технических характеристик воздушных судов гражданской авиации. М.: Воздушный транспорт, 2005. 416 с.
3. Дружинин Г.В. Анализ эрготехнических систем. М.: Энергоатомиздат, 1984. 159 с.
4. Мэзон С., Циммерман Г. Электронные цепи, сигналы и системы. М.: Мир, 1963. 622 с.
5. Надежность технических систем: справочник / под ред. И.А.Ушакова. М.: Радио и связь, 1985. 604 с.
6. Писаренко В.Н. Техническая эксплуатация и ремонт авиационных электрических систем и пилотажно-навигационных комплексов. Самара: Изд. СГАУ, 2007. Ч. 1. 203 с.
7. Савенков М.В. Автоматизация управления технической эксплуатацией авиационных систем. М.: Транспорт, 1992. 285 с.
8. Состояние безопасности полетов в гражданской авиации государств-участников соглашения о гражданской авиации и об использовании воздушного пространства в 2015 г. М.: Международный авиационный комитет (МАК), 2016. 114 с.
9. Технологические системы. Технические требования к методам оценки надежности по параметрам производительности. ГОСТ 27.204-83. М.: Госстандарт, 1988. 37 с.
10. Чокоей В.З. Инструменты непараметрической надежности авиационной техники при цензурированных данных // CredeExperto: 2016. № 2 (9).
11. Чокоей В.З. Инструменты принятия диагностических решений по объектам авиатехники в условиях неопределенности и риска // CredeExperto. 2016. № 2 (9). С. 45-46.
12. Чокоей В.З. Использование дисперсионных распределений для оценки надежности эрготехнических объектов // Материалы IV научно-практической конференции преподавателей, научных работников и аспирантов: «Актуальные проблемы и перспективы развития гражданской авиации России»: сб. тр. Иркутск, 2014. С. 192-195.
13. Чокоей В.З. Электронный тренажер Speller-TSM по локализации отказов оборудования самолетов AirbusA320 // CredeExperto. 2016. № 1 (8). С. 26-28.
14. Чокоей В.З. Электронный тренажерно-информационный ресурс Speller для обучения обслуживанию самолетов Airbus // CredeExperto. 2016. № 2 (9). С. 12-16.
15. Чокоей В.З., Кабыкин А.В. Оценка сохраняемости авиационной техники // Сб. Научные труды адъюнктов и соискателей: сб. ст. Иркутск, 2001. Вып. 6. С. 72-76.
16. Чокоей В.З., Кабыкин А.В., Чокоей Р.В. Оценка периодичности профилактических работ при хранении авиационной техники // Научные труды адъюнктов и соискателей: сб. ст. Иркутск, 2001. Вып. 6. С. 77-79.
17. Чокоей В.З., Чокоей Р.В. Допустимый период основания прогноза технического состояния объектов авиационной техники // Вестн. ИрГТУ. 2011. № 1 (48). С. 128-132.
18. Чокоей В.З., Чокоей Р.В. Надежность эргатических систем предупреждения нештатных ситуаций на объектах промышленности и транспорта // Вестн. ИрГТУ. 2011. № 9 (56). С. 124-129.
19. The Airport CDM Implementation, April 2012, e-version /Airport CDM adverse conditions, EUROCONTROL, 359 p.

References

1. Velichko I.I., Chokoj V.Z. Reliability and technical diagnostics of aviation engineering. . Irkutsk: IVAII (voen. in-t), 2006. 187 p.

2. Daleckij S.V. Forming of operational technical characteristics of air vehicles of the civil aviation. M.: Vozdushnyj transport, 2005. 416 p.
3. Druzhinin G.V. Analysis ergotekhnich of systems. M.: Jenergoatomizdat, 1984. 159 p.
4. Mjezon S., Cimmerman G. Electronic chains, signals and systems. M.: Mir, 1963. 622 p.
5. Reliability of technical systems: spravochnik / pod red. I.A.Ushakova. M.: Radio i svjaz', 1985. 604 p.
6. Pisarenko V.N. Technical operation and repair of aviation electric systems and flight and navigation complexes. Samara: Izd. SGAU, 2007. Ch. 1. 203 p.
7. Savenkov M.V. Management automation by technical operation of aviation systems. M.: Transport, 1992. 285 p.
8. A security status of flights in the civil aviation of the State Parties of the agreement on the civil aviation and about use of air space in 2015. M.: Mezhdunarodnyj aviacionnyj komitet (MAK), 2016. 114 p.
9. Technological systems. Technical requirements to reliability evaluation methods in performance parameters. GOST 27.204-83. M.: Gosstandart, 1988. 37 p.
10. Chokoj V.Z. Tools of nonparametric reliability of aviation engineering in case of the tsenzurir of data // CredeExperto: 2016. № 2 (9).
11. Chokoj V.Z. Instruments of adoption of diagnostic decisions on objects of aviation equipment in the conditions of uncertainty and risk // CredeExperto. 2016. № 2 (9). P. 45-46.
12. Chokoj V.Z. Use of dispersive distributions for an assessment of reliability of ergo-technical objects // Materialy IV nauchno-prakticheskoy konferencii prepodavatelej, nauchnyh rabotnikov i aspirantov: «Aktual'nye problemy i perspektivy razvitiya grazhdanskoj aviacii Rossii»: sb. tr. Irkutsk, 2014. P. 192-195.
13. Chokoj V.Z. Electronic Speller-TSM simulator for localization of equipment failures of the AirbusA320 planes // CredeExperto. 2016. № 1 (8). P. 26-28.
14. Chokoj V.Z. The electronic training-information Speller resource for training in aircraft maintenance Airbus // CredeExperto. 2016. № 2 (9). P. 12-16.
15. Chokoj V.Z., Kabykin A.V. Assessment of a keeping of aviation engineering // Sb. Nauchnye trudy adjunktov i soiskatelej: sb. st. Irkutsk, 2001. Vyp. 6. P. 72-76.
16. Chokoj V.Z., Kabykin A.V., Chokoj R.V. Assessment of frequency of scheduled maintenance in case of storage of aviation engineering // Nauchnye trudy adjunktov i soiskatelej: sb. st. Irkutsk, 2001. Vyp. 6. P. 77-79.
17. Chokoj V.Z., Chokoj R.V. Admissible period of the basis of the forecast of technical condition of objects of aviation engineering // Bulletin of Irkutsk State Technical University. 2011. № 1 (48). P. 128-132.
18. Chokoj V.Z., Chokoj R.V. Reliability of ergatic systems of the prevention of emergency situations on objects of the industry and transport // Bulletin of Irkutsk State Technical University. 2011. № 9 (56). P. 124-129.
19. The Airport CDM Implementation, April 2012, e-version /Airport CDM adverse conditions, EUROCONTROL, 359 p.

УДК 621.315.1

DOI: 10.18324/2077-5415-2016-3-135-142

Учет грозозащитного троса при моделировании передачи электрической энергии пониженного качества*

М.А. Шевченко^а, Г.А. Большанин^б

Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия

^аshevchenkomix@hotmail.com, ^бbolshaning@mail.ru

Статья получена 16.06.2016, принята 5.08.2016

Предлагаются схема замещения и математическая модель передачи электрической энергии пониженного качества по воздушной линии электропередачи (ЛЭП) трехпроводного исполнения с грозозащитным тросом. Приведенная в статье схема замещения учитывает наличие грозозащитного троса, описывает его связь с токоведущими частями ЛЭП и землей. Продольные параметры исследуемой ЛЭП на схеме замещения представлены погонными активными сопротивлениями линейных проводов и грозозащитного троса и их погонными собственными индуктивностями. Поперечные параметры анализируемого участка ЛЭП иллюстрируют электромагнитные связи между линейными проводами, а также между линейными проводами и поверхностью земли. Математическая модель участка линии электропередачи построена на основании схемы замещения с использованием законов Кирхгофа и состоит из четырнадцати уравнений. С ее помощью возможно провести анализ распределения напряжения и тока вдоль исследуемого участка высоковольтной ЛЭП. Показано, что при анализе передачи энергии пониженного качества ЛЭП даже сравнительно небольшой протяженности следует принимать за линии с распределенными параметрами, а схема замещения такой линии должна быть полнофазной. При математическом моделировании передачи электрической энергии такой линии следует учитывать все электромагнитные связи между токоведущими частями ЛЭП.

Ключевые слова: воздушная линия; грозозащитный трос; электрическая энергия пониженного качества; полнофазная схема замещения; гармонические составляющие.