

УДК 656.71.06:621.31

ОЦЕНКА НАДЁЖНОСТИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ АЭРОПОРТА ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ

П.О. МАРАСАНОВ

Статья представлена доктором технических наук, профессором Кузнецовым С.В.

В статье рассматривается надёжность системы электроснабжения аэропорта. Приведены количественные показатели надёжности системы электроснабжения аэропорта гражданской авиации, системные и несистемные факторы, которые влияют на значения показателей. Проанализированы положения нормативных документов для проектирования структурных элементов системы. Рассмотрены факторы, которые определяют условия применения математических моделей для получения значений показателей надёжности.

Ключевые слова: аэропорт, безопасность полётов, оценка надёжности систем электроснабжения, методы определения надёжности, математические модели.

Введение

В структуре транспортной системы воздушный (или авиационный) транспорт занимает специфическое положение по отношению к другим видам транспорта. Известны районы производственной деятельности, транспортная доступность которых формируется исключительно авиационными перевозками. Аэропорты гражданской авиации являются ключевыми элементами авиационного транспорта [1]. Вместе с воздушными трассами аэропорты формируют сеть коммерческих предприятий, осуществляющих оказание транспортных услуг регулярного и нерегулярного характера. Современный формат требований по эксплуатации аэропортов гражданской авиации определяет необходимость обеспечения высокого уровня безопасности производства полетов [2].

Системы электроснабжения аэропорта гражданской авиации

Аэропорт гражданской авиации – это высокотехнологичный комплекс инженерных сооружений и оборудования, предназначенный для реализации транспортных услуг специальными транспортными средствами – воздушными судами.

Соответственно технологическая схема аэропорта, предназначенная для осуществления транспортных услуг, включает технологические линии по обслуживанию пассажирских и грузовых потоков, транспортных средств и внутренних процессов, направленных на обеспечение функционирования самого аэропорта [3].

Системы электроснабжения аэропортов (СЭС АП) являются техническими системами, которые предназначены для обеспечения производства технологических процессов (потребителей электроэнергии (ПЭ)), которые включены в технологические схемы аэропортов [4].

ПЭ аэропортов гражданской авиации характеризуются функциональным и конструктивным разнообразием, а требования по обеспечению их электроэнергией приводятся в соответствующей нормативной документации.

Для обеспечения ПЭ электроэнергией система электроснабжения аэропорта включает следующие структурные элементы:

- источник (или источники) питания электроэнергией: централизованный источник питания (ЦИП) или индивидуальный источник питания (ИИП);
- высоковольтная линия (или линии) электропередач (ЛЭП);
- трансформаторные подстанции (ТП);
- распределительная сеть.

Часть системы электроснабжения аэропорта без генерирующих мощностей (ЦИП, ИИП) называется электрической сетью [4].

Системы электроснабжения аэропортов являются сложной технической системой, состоящей из большого числа структурных элементов, которые находятся в состоянии сложного взаимодействия [4; 5].

Элементы системы электроснабжения характеризуются зависимостью от других технических систем (топливно-энергетического комплекса (ТЭК) и объектов аэропорта) и непрерывностью во времени производственных процессов, связанных с производством, распределением и потреблением электроэнергии (рис. 1).

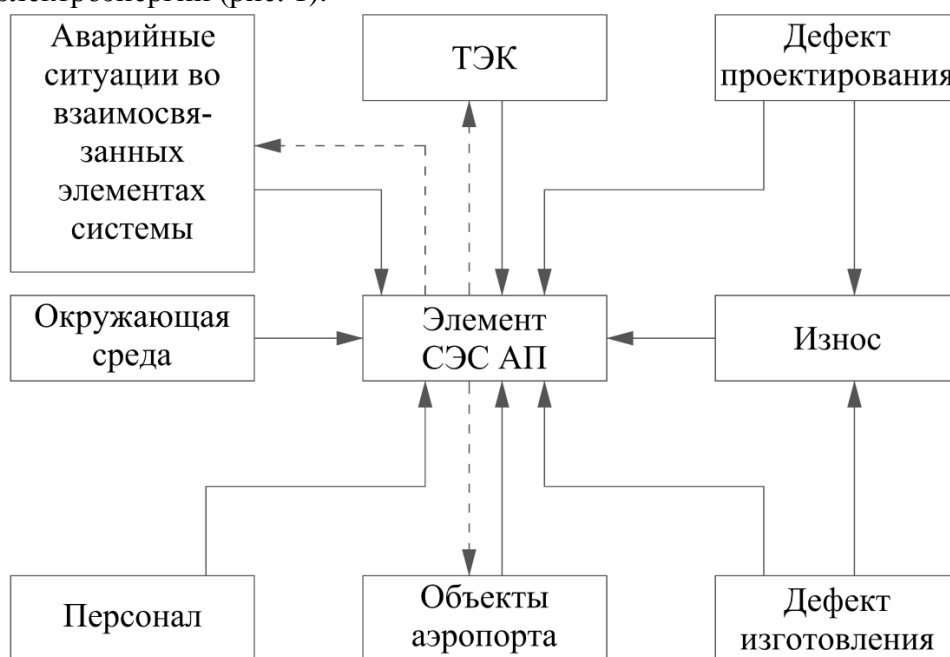


Рис. 1. Схема воздействий и взаимосвязей для элементов СЭС АП

Надёжность и безопасность системы электроснабжения аэропорта

В современных рыночных условиях надёжность систем электроснабжения ассоциируется с экономическими показателями и энергетической безопасностью предприятий [6]. Надёжность СЭС АП – характеристика непрерывного технологического процесса обеспечения потребителей электроэнергией установленного качества, в строгом соответствии с принятым графиком потребления, по установленной (запроектированной) схеме потребления [4].

Центральным показателем надёжности объекта технической системы является понятие отказа – утрата некоторого необходимого качества. Классификация видов, последствий и причин отказов рассматривается в нормативных документах [8; 9].

Надёжность СЭС АП определяется системой качественных и количественных показателей теории надёжности [7; 9].

В табл. 1 представлены формулы, которые используются в аналитических методах расчёта количественных показателей надёжности.

В табл. 1 приняты следующие обозначения:

τ – наработка элемента, находящегося в работоспособном состоянии от начального момента времени ($t = 0$) до момента проявления отказа;

N – число элементов, работоспособных в начальный момент времени, ($t = 0$);

$n(t)$ – число элементов, для которых зафиксировано наступление отказа, в рассматриваемом интервале времени от 0 до t .

Приведенные в табл. 1 показатели надёжности определяют параметры надёжности одной из

групп структурных элементов СЭС АП – невосстанавливаемых элементов системы электроснабжения [4; 7]. Для характеристики восстанавливаемых элементов СЭС АП применяются следующие единичные количественные показатели надёжности, определяемые при помощи методов математической статистики [4; 7]:

- параметр потока отказов;
- наработка на отказ;
- среднее время восстановления.

Таблица 1

Характеристика количественных показателей надёжности

Наименование показателя надёжности	Аналитические методы определения величины показателя	
	теории вероятности	математической статистики
Вероятность безотказной работы	$p(t) = p(t > \tau)$	$p^*(t) = 1 - \frac{n(t)}{N}$
Вероятность отказа	$q(t) = 1 - p(t)$	$q^*(t) = \frac{n(t)}{N}$
Интенсивность отказов	$\lambda(t) = \frac{1}{p(t)} \cdot \frac{dq(t)}{dt}$	$\lambda^*(t) = \frac{n(t)}{(N - n(t)) \cdot t}$
Средняя наработка на отказ	$T_1 = \int_0^{\infty} p(t) dt$	$T_1^* = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \tau_i$

Для оценки надёжности вместе с единичными показателями применяются комплексные показатели надёжности, которые одновременно характеризуют несколько свойств элементов СЭС АП [4; 7]:

- коэффициент готовности;
- коэффициент вынужденного простоя;
- коэффициент отказов;
- коэффициент относительного простоя.

В зависимости от целей управления показатели надёжности характеризуют уровень надёжности потребления энергии для ПЭ или уровень надёжности технических устройств.

Действующая система показателей надёжности СЭС АП (единичных и комплексных) ориентирована на сбор и аналитическую обработку предварительной информации, которая в дальнейшем составит методическую основу для проектирования новых объектов (систем электроснабжения).

Располагая информацией о количественных значениях показателей для отдельных элементов, можно рассчитать надёжность соответствующей структурной системы электроснабжения.

На рис. 2 представлена укрупненная логическая схема СЭС АП.

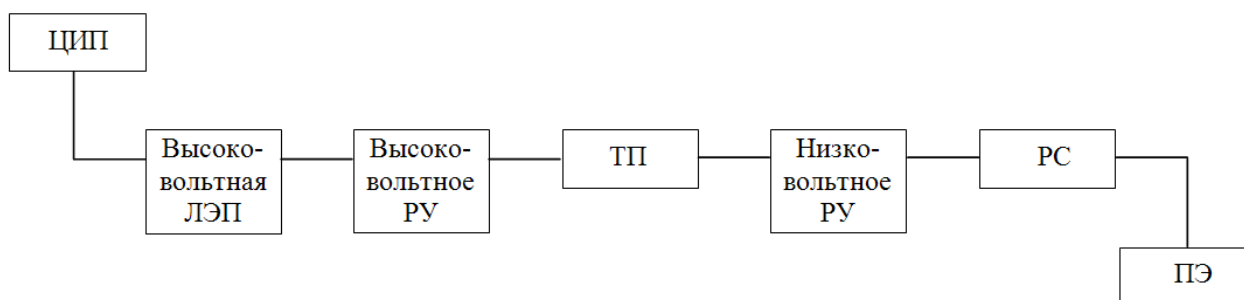


Рис. 2. Логическая схема СЭС АП

На рис. 2 приняты следующие сокращения: ЦИП – централизованный источник питания; ЛЭП – линия электропередач; ТП – трансформаторная подстанция; РУ – распределительное устройство; РС – распределительная сеть; ПЭ – потребитель электроэнергии.

Количественный показатель надёжности системы в формате вероятности безотказной работы (табл. 1) представляется в виде

$$P(t) = P_{\text{ЦИП}}(t) \cdot P_{\text{в.ЛЭП}}(t) \cdot P_{\text{в.РУ}}(t) \cdot P_{\text{ТП}}(t) \cdot P_{\text{н.РУ}}(t) \cdot P_{\text{РС}}(t) \cdot P_{\text{ПЭ}}(t), \quad (1)$$

где

$$P_{\text{ЦИП}}(t) \neq P_{\text{в.ЛЭП}}(t) \neq P_{\text{в.РУ}}(t) \neq P_{\text{ТП}}(t) \neq P_{\text{н.РУ}}(t) \neq P_{\text{РС}}(t) \neq P_{\text{ПЭ}}(t). \quad (2)$$

Анализ логической схемы СЭС АП показывает, что подключение структурных элементов производится по последовательной схеме [4]. При необходимости изменить, а точнее, увеличить значение показателя вероятности безотказной работы системы возможно одним из трёх способов:

способ 1 – параллельным присоединением технических устройств только для одного структурного элемента (рис. 3);

способ 2 – параллельным присоединением технических устройств для нескольких (более одного) структурных элементов (рис. 4);

способ 3 – параллельным присоединением технических устройств для всех структурных элементов (рис. 5).

Способ 1 предполагает решение задачи повышения надёжности СЭС АП увеличением показателя надёжности для самого «ненадёжного» структурного элемента, например, при исходном условии

$$P_{\text{в.ЛЭП}}(t) < P_{\text{в.РУ}}(t) < P_{\text{ТП}}(t) < P_{\text{н.РУ}}(t) < P_{\text{РС}}(t) < P_{\text{ПЭ}}(t) < P_{\text{ЦИП}}(t). \quad (3)$$

Параллельное подключение технических устройств для рассматриваемого структурного элемента возможно с применением нескольких, двух и более, технических устройств (например, трёх высоковольтных ЛЭП: ЛЭП 1, ЛЭП 2, ЛЭП 3 (рис. 3)), характеристики показателей надёжности которых могут быть приняты одинаковыми или различными.

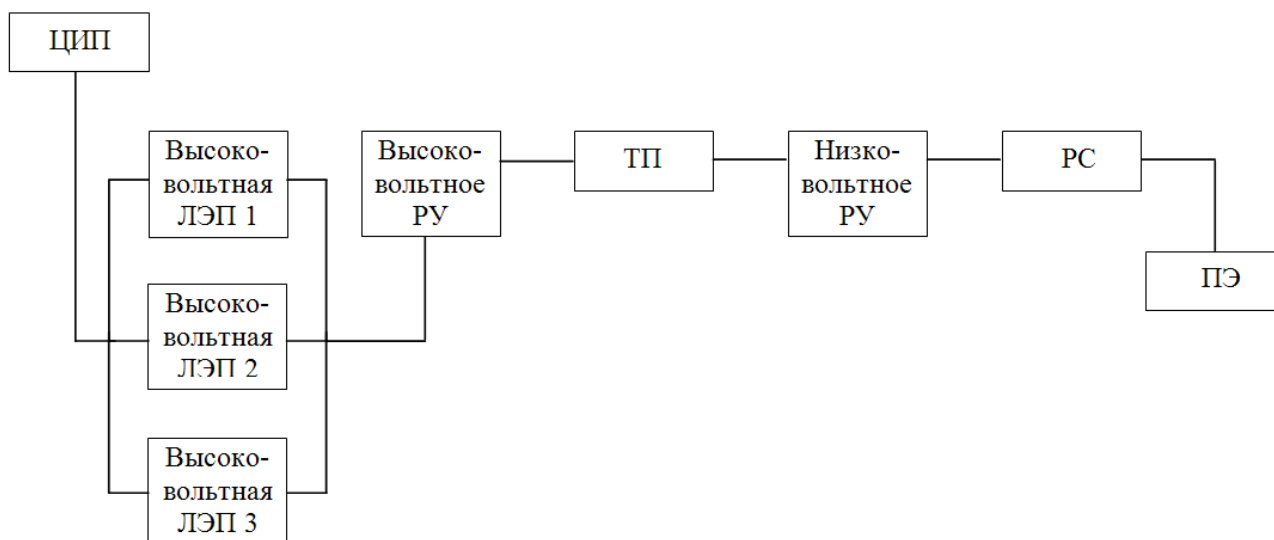


Рис. 3. Логическая схема СЭС АП при параллельном присоединении устройств только для одного структурного элемента

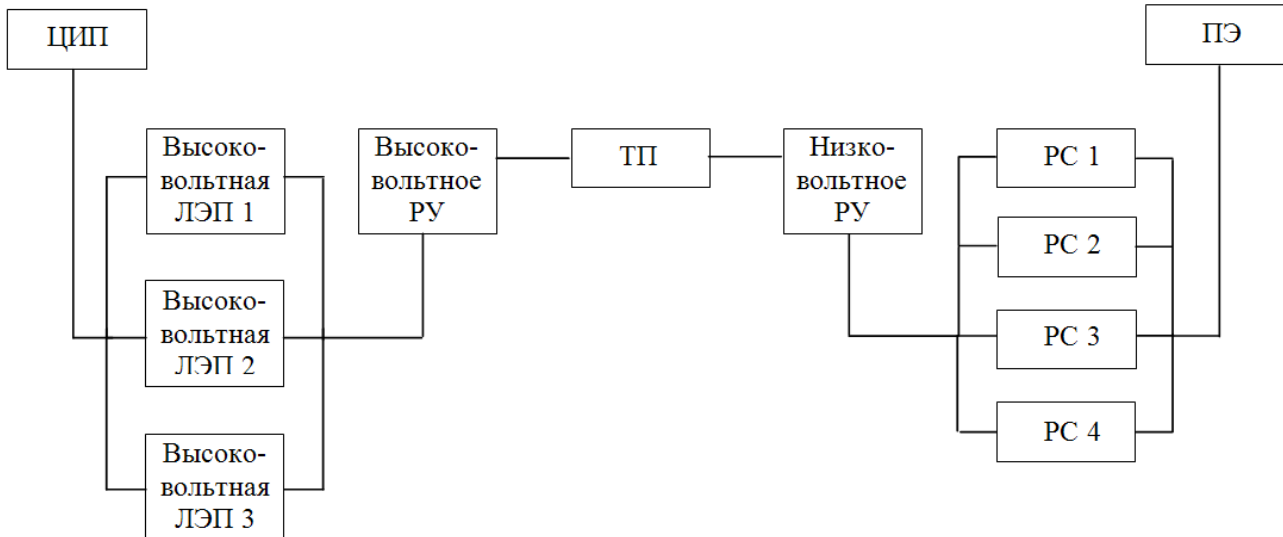


Рис. 4. Логическая схема СЭС АП при параллельном присоединении устройств для нескольких (более одного) структурных элементов

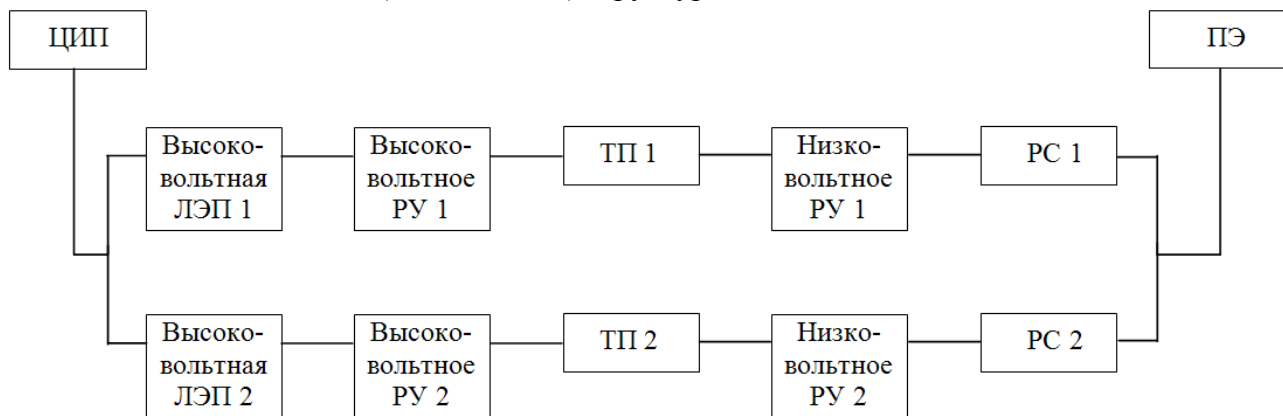


Рис. 5. Логическая схема СЭС АП при параллельном присоединении устройств для всех элементов системы

Способ 2 предполагает решение задачи повышения надёжности СЭС АП увеличением показателя надёжности для нескольких (более одного) структурных элементов, например, при исходном условии

$$P_{\text{в.лэп}}(t) < P_{\text{рс}}(t) < P_{\text{в.ру}}(t) < P_{\text{тп}}(t) < P_{\text{н.ру}}(t) < P_{\text{пэ}}(t) < P_{\text{цип}}(t). \quad (4)$$

Параллельное подключение технических устройств для рассматриваемых структурных элементов возможно с применением нескольких, двух и более, технических устройств (например, трёх высоковольтных ЛЭП: ЛЭП 1, ЛЭП 2, ЛЭП 3 и четырёх РС: РС 1, РС 2, РС 3, РС 4 (рис. 4)), с различными или одинаковыми значениями показателей надёжности.

Способ 3 предполагает решение задачи повышения надёжности СЭС АП кратным увеличением показателя надёжности с применением нескольких, двух и более, независимых систем (например, двух независимых систем (рис. 5)).

Рассмотренные способы увеличения показателей надёжности СЭС АП формируют систему резервирования основных (или минимально необходимых) технических устройств для обеспечения электроэнергией ПЭ в аэропорту. Способ резервирования, состав и характеристики технических устройств регламентируются нормативными документами и технико-экономическим обоснованием [7; 8; 9].

Математическая модель вероятности надёжности электроснабжения

Действующая нормативная база, регламентирующая порядок применения резервирования технических устройств (постоянных и замещающих) структурных элементов СЭС АП, характеризуется ретроспективным влиянием на вопросы, связанных с проектированием новых объектов.

Изменения в условиях проектирования утверждаются только после накопления определенного объема статистической (абсолютно достоверной) информации и методической обработки данных. Влияние динамически изменяющейся окружающей (искусственной и естественной) среды способно достаточно серьезно повлиять на условия функционирования системы (например, влияние гололедных нагрузок на провода высоковольтных ЛЭП может привести к отказу как для резервируемых систем (рис. 3-5), так и для нерезервируемой системы электроснабжения (рис. 2)). Человеческий фактор в формате персонала, который привлекается к обслуживанию, управлению и контролю технических систем, при недостаточном уровне квалификации вполне способен внести коррективы в предполагаемый при проектировании уровень надёжности СЭС АП.

Для решения задач проектирования СЭС АП, связанных с факторами, не конкретизированными положениями нормативными документами, используются модели физического и нефизического характера [8; 9].

Физические модели, такие как тренажёры и стенды, используются для анализа материальной части, модели нефизического характера применяются для решения аналитических задач [10].

Концепция построения моделей нефизического характера включает в себя понятия моделирования деревьев событий и деревьев отказов.

Математические модели дерева событий и дерева отказов позволяют аналитически моделировать и анализировать пути протекания процессов в системе, определять характеристики взаимодействия элементов модели и получать простое представление полученных характеристик надёжности для структурных элементов СЭС АП.

Выводы

Рассмотрены основные структурные элементы системы электроснабжения аэропорта. Приведена классификация количественных показателей надёжности и способов повышения их значений. Проведен анализ возможностей и необходимости применения математических моделей для характеристики уровня надёжности систем электроснабжения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Аэропорты. Приложение № 14 к конвенции о международной гражданской авиации. Международные стандарты и рекомендуемая практика.* 3-е изд. Монреаль: ИКАО. 1999. 222 с.
2. *Doc 9137. Руководство по аэропортовым службам. Часть 9. Практика технического обслуживания аэропортов. Международная Организация Гражданской Авиации.* 1-е изд. Монреаль: ИКАО, 1984. [Электронный ресурс]. URL: http://www.aviadocs.net/icaodocs/Docs/9137_9_conc_ru.pdf.
3. **Ашфорд Н.** *Функционирование аэропорта* / Н. Ашфорд, П.М. Стентон, К.А. Мур / пер. с англ. В.И. Ноздрина. М.: Транспорт, 1990. 417 с.
4. **Гладыш И.С., Андреев П.Л.** *Электроснабжение аэропортов: учеб. пособие для средних специальных учебных заведений гражданской авиации.* М.: Транспорт, 1979. 247 с.
5. **Рябинин И.А.** *Надёжность и безопасность структурно-сложных систем.* СПб.: Политехника, 2000. 304 с.
6. Федеральная целевая программа Энергоснабжения России (1998-2005 гг.).
7. **Фокин Ю.А.** *Вероятностно-статистические методы в расчётах систем электроснабжения.* М.: Энергоатомиздат, 1985. 215 с.
8. **ГОСТ 27.310-95.** *Надёжность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения.* М.: Изд-во стандартов, 1998. 64 с.
9. **ГОСТ 27003-83.** *Выбор и нормирование показателей надёжности. Основные положения.* М.: Изд-во стандартов, 1984. 20 с.

10. Черкесов Г.Н., Можяев А.С. *Методы и модели оценки живучести сложных систем*. М.: Знание, 1985. 529 с.

RELIABILITY ASSESSMENT OF AIRPORT SYSTEMS OF POWER SUPPLY

Marasanov P.O.

The modern airport is a key element of civil aviation. Safety of flight of civil aviation depends on a number of indicators, and reliability of power supply system of the airport is one of them. Level of reliability system of power is determined by interaction of structural elements. In the article questions of quantitative indices of reliability are considered. Conditions of application of mathematical models are also considered.

Keywords: airport, safety of flight, reliability assessment of power system, methods of determination of reliability, mathematical models.

REFERENCES

1. *Aeroporty. Prilozheniye № 14 k konventsii o mezhdunarodnoy grazhdanskoj aviatsii. Mezhdunarodnyye standarty i rekomenduyemaya praktika*. 3 izd. Monreal': ICAO. 1999. 222 p. (In Russian).
2. *Doc 9137. Rukovodstvo po aeroportovym sluzhbam. Chast' 9. Praktika tekhnicheskogo obsluzhivaniya aeroportov. Mezhdunarodnaya Organizatsiya Grazhdanskoj Aviatsii*. 1-ye izd. Monreal': ICAO. 1984. URL: http://www.aviadocs.net/icaodocs/Docs/9137_9_conc_ru.pdf. (In Russian).
3. Ashford N. Funktsionirovaniye aeroporta. N. Ashford, P.M. Stenton, K.A. Mur. Per. s angl. V.I. Nozdrina. M.: Transport. 1990. 417 p. (In Russian).
4. Gladyshev I.S., Andreyev P.L. *Elektrosnabzheniye aeroportov. Uchebnoye posobiye dlya srednikh spetsial'nykh uchebnykh zavedeniy grazhdanskoj aviatsii*. M.: Transport. 1979. 247 p. (In Russian).
5. Ryabinin I.A. *Nadozhnost' i bezopasnost' strukturno-slozhnykh sistem*. SPb.: Politekhnik. 2000. 304 p. (In Russian).
6. *Federal'naya tselevaya programma Energosnabzheniya Rossii (1998-2005 gg.)*. (In Russian).
7. YU.A. Fokin. *Veroyatnostno-statisticheskiye metody v raschetakh sistem elektrosnabzheniya*. M.: Energoatomizdat. 1985. 215 p. (In Russian).
8. GOST 27.310-95. *Nadezhnost' v tekhnike. Analiz vidov, posledstviy i kritichnosti otkazov. Osnovnyye polozheniya*. M.: Izd-vo standartov. 1998. 64 p. (In Russian).
9. GOST 27003-83. *Vybor i normirovaniye pokazateley nadozhnosti. Osnovnyye polozheniya*. M.: Izd-vo Standartov. 1984. 20 p. (In Russian).
10. Cherkesov G.N., Mozhayev A.S. *Metody i modeli otsenki zhivuchesti slozhnykh sistem*. M.: Znaniye. 1985. 529 p. (In Russian).

Сведения об авторе

Марасанов Павел Олегович, 1988 г.р., окончил МГТУ ГА (2011), аспирант МГТУ ГА, автор 2 научных работ, область научных интересов – системы электроснабжения аэропортов.