

УДК 681.5.09

Т.А. Кузнецова

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия

АЛГОРИТМЫ АНАЛИЗА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ КАБЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА В СОСТАВЕ САУ ГТД

Проводится исследование методов оценки безопасности и технического состояния электрических кабелей в составе систем автоматического управления авиационными газотурбинными двигателями. Надежность систем автоматического управления газотурбинными авиационными двигателями (САУ ГТД) во многом определяется отказоустойчивостью систем ввода входной информации и коммуникаций, обеспечивающих связь регулятора и объекта управления. Система электрических кабелей связывает первичные преобразователи информации (датчики) и исполнительные механизмы, находящиеся на объекте управления (двигателе), с цифровым электронным регулятором. В работе решается актуальная задача повышения точности методов диагностики электрических кабелей постоянного тока. Одной из проблем при диагностике кабелей постоянного тока является анализ распределения напряженности и потенциала электрического поля во внешней среде. Целью исследования является разработка корректного метода анализа электрического поля кабеля постоянного тока. В рамках решаемой задачи разработан алгоритм анализа напряженности и потенциала электрического поля кабеля постоянного тока, расположенного вблизи границ раздела двух сред с различной удельной электрической проводимостью. В основу алгоритма положен метод Сирла. Расчет ведется с помощью метода суперпозиции, применимого для задач данного класса. Исследуется проблема влияния выбранных граничных условий на точность вычислений. В качестве критерия выбрана координата максимального значения потенциала на границе раздела двух сред. При введении опорной проводящей поверхности (земли) наблюдаются искажение картины поля и смещение максимума. Предлагаются оптимальные соотношения расстояний от электрического кабеля до вводимой опорной поверхности и до границы раздела, обеспечивающие заданную точность расчетов.

Ключевые слова: система автоматического управления газотурбинного двигателя, электрический кабель, диагностика, электрическое поле постоянного тока, электрический потенциал.

T.A. Kuznetsova

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

ANALYSIS OF THE DC-CABLES' ELECTRIC FIELDS IN AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS OF AIRCRAFT TURBINE ENGINES

The study is devoted to methods of the safety assessing and technical analysis of electric cables as part of automatic control systems of aircraft gas turbine engines. The reliability of automatic control systems of gas turbine aircraft engines (ACS GTE) is substantially determined by the fault toler-

ance of input information systems and communications providing the communication between the controller and the control object. The system of electric cables connects the primary information converters (sensors) and actuators located on the control object (engine) with a digital electronic regulator. The actual task of increasing the accuracy of diagnostics methods of direct current (DC) electric cables is being solved. One of the problems DC cables' diagnostics is the analysis of the distribution of the electric field strength and potential in the external environment. The purpose of the study is design of a correct method for analyzing the electric field of a DC. For solving this task an algorithm for analysis of the electric field's strength and potential of DC cable located near the interfaces of two media with different specific electric conductivity has been developed. The algorithm is based on the Searle method. The calculation is carried out by superposition method, which is applicable for this class of tasks. The problem of the chosen boundary conditions' influence on the calculations' accuracy is investigated. As estimation criterion, the coordinate of the maximum potential at the interface between the two media is chosen. When a reference conductive surface (ground) is introduced, there is a distortion in the field pattern and a shift of the maximum. The optimal ratios of the distances from the electric cable to the input reference surface and to the interface of two media with different specific electric conductivity are proposed, which ensure a given accuracy of calculations.

Keywords: automatic control system of gas-turbine engine, electric cable, diagnostics, electric field of direct current, electric potential.

Введение. При разработке высоконадежных систем автоматического управления газотурбинными авиационными двигателями (САУ ГТД) серьезное внимание уделяется отказоустойчивости систем ввода входной информации [1, 2], а также коммуникаций, обеспечивающих связь регулятора и объекта управления, что обуславливает необходимость эффективной оценки безопасности и технического состояния электрических кабелей.

Система электрических кабелей связывает первичные преобразователи информации (датчики) и исполнительные механизмы, находящиеся на двигателе с цифровым электронным регулятором [3, 4, 5]. В частности, электрические коммуникации необходимы для обеспечения связи двигателя и пускового устройства, предназначенного для раскрутки ротора ГТД до частоты вращения, при которой обеспечивается надежное воспламенение топлива в камере сгорания, в результате чего турбина начинает развивать достаточную для дальнейшей самостоятельной раскрутки положительную мощность на валу ротора. Пусковое устройство управляется цифровым САУ ГТД, поэтому на современных ГТД используются электрические пусковые устройства. Причем вследствие широкого использования в качестве бортового источника питания аккумуляторных батарей большее распространение получили стартеры постоянного тока, подключение которых к САУ ведется специальными кабелями, монтаж и эксплуатация которых осуществляются в соответствии со специальными требованиями [6, 7, 8, 9]. Соответственно, надежность бортовых информационно-измерительных систем также зависит от состояния соединительных кабелей [10, 11, 12].

В связи с этим актуальной задачей является разработка более точных и научно-обоснованных методов диагностики электрических полей кабелей постоянного тока, входящих в состав бортовых регуляторов узлов авиационных двигателей. Одной из проблем при диагностике кабелей постоянного тока является анализ распределения напряженности и потенциала электрического поля во внешней среде. Эта проблема связана как с эффективностью функционирования САУ, так и с безопасностью полета.

1. Материал и методы исследования. Целью исследования является разработка корректного алгоритма анализа электрического поля кабеля постоянного тока, расположенного вблизи границ раздела двух сред с различной удельной электрической проводимостью.

Известно [13, 14], что электрическое поле постоянного тока является потенциальным, и его напряженность \vec{E} связана с потенциалом ϕ с помощью формулы (1):

$$\vec{E} = -\text{grad}\phi \text{ или } \text{rot}\vec{E} = 0. \quad (1)$$

В соответствии с методом Сирла [15, 16] задача расчета поля цилиндрического проводника с постоянным током I , расположенного вблизи границы раздела двух неидеальных диэлектрических сред с различной проводимостью γ_1 и γ_2 (схема приведена на рис. 1, а), сводится к решению двух подзадач (расчетные подсхемы для анализа поля в верхней и нижней полуплоскости приведены соответственно на рис. 1, б, в). При этом:

$$I_2 = \frac{\gamma_1 - \gamma_2}{\gamma_1 + \gamma_2} I, \quad (2)$$

$$I_3 = \frac{2\gamma_2}{\gamma_1 + \gamma_2} I.$$

Введением фиктивных токов $I_{2,3}$ производится учет перераспределения связанных зарядов на границе раздела двух сред, влияющего на электрическое поле в обеих средах. Выбор величин $I_{2,3}$ осуществляется на основе граничных условий, связывающих величины векторов напряженности \vec{E} и плотности тока $\vec{\delta}$, что определяет единственность решения:

$$E_{1t} = E_{2t}, \quad \delta_{1n} = \delta_{2n}. \quad (3)$$

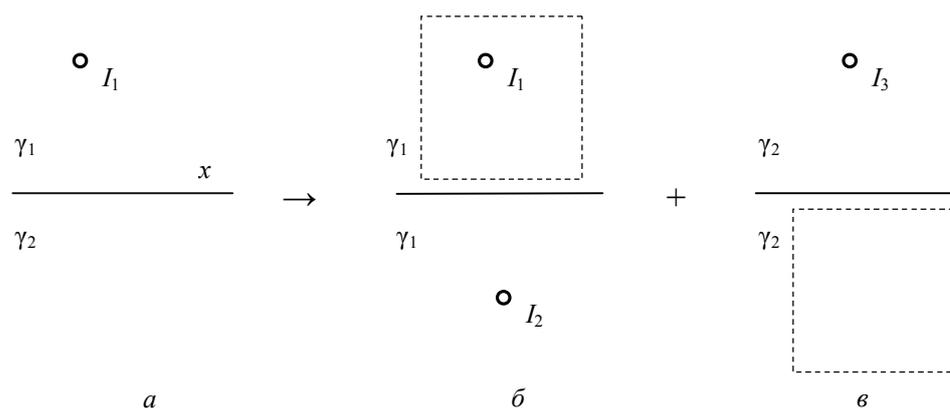


Рис. 1. Схема для расчета поля цилиндрического проводника с постоянным током I , расположенного вблизи границы раздела двух сред с различной проводимостью

Известно, что ток может быть определен как поток вектора $\vec{\delta}$:

$$I = \int_s \vec{\delta} d\vec{S} = \gamma \int_s \vec{E} d\vec{S}. \quad (4)$$

Отсюда для цилиндрического проводника длиной l с постоянным током I однозначно может быть определена величина напряженности в любой точке создаваемого им электрического поля:

$$E = \frac{I}{2\pi\gamma lr}, \quad (5)$$

где r – расстояние от проводника до исследуемой точки поля.

При этом величина потенциала в любой точке поля для любой полуплоскости может быть найдена только с точностью до некоторой постоянной интегрирования $C = \text{const}$, определение которой в большинстве практических задач затруднено:

$$\varphi = \frac{I}{2\pi\gamma l} \ln \frac{1}{r} + C. \quad (6)$$

В общем случае величина C зависит от заданных граничных условий.

Одним из традиционно применяемых на практике способов получения единственного решения является введение опорной граничной поверхности («земли»), имеющей нулевой потенциал [17, 18]. В этом случае решение ведется методом зеркальных изображений, и схема решения принимает вид, показанный на рис. 2 [19, 20].

Введение зеркально отраженных дополнительных (фиктивных) проводов учитывает изменение картины электрического поля в диэлектрике, вызванное перераспределением зарядов в проводнике. Расчетные подходы для анализа поля в верхней и нижней полуплоскости приведены соответственно на рис. 2, б, в.

В рассматриваемом случае можно точно определить потенциал и напряженность в любой точке электрического поля в обеих диэлектрических средах. При этом на границе раздела диэлектриков функция потенциала непрерывна, что позволяет использовать для расчета потенциала на границе любую из двух вспомогательных подходов (см. рис. 2, б, в).

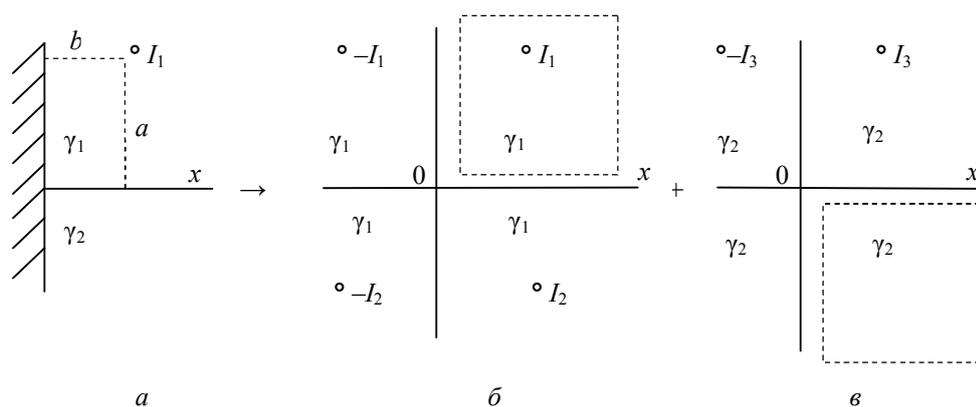


Рис. 2. Схема для расчета электрического поля цилиндрического проводника с постоянным током I , расположенного вблизи границы раздела двух сред с различной проводимостью при введении заземленной опорной проводящей поверхности

Однако, как показали исследования, введение опорной граничной поверхности вносит искажение в картину электрического поля (рис. 3).

В частности, функция распределения потенциала $\phi(x)$ вдоль оси абсцисс, совпадающей с границей раздела двух диэлектриков, изменяется от 0 (при $x = 0$) до 0 (при $x = \infty$) и имеет явно выраженный максимум, который в исходной задаче приходится на координату, соответствующую местоположению данного проводника с током (кривая 1 на рис. 3). В то время как для предложенной расчетной схемы, включающей опорную проводящую поверхность, координата максимума потенциала смещается относительно своего истинного местоположения (кривая 2 на рис. 3) и зависит от расстояния b до нее, как правило, выбираемого произвольно.

Таким образом, корректность алгоритма анализа электрического поля рассматриваемого кабеля определяется учетом влияния данного расстояния на точность решения.

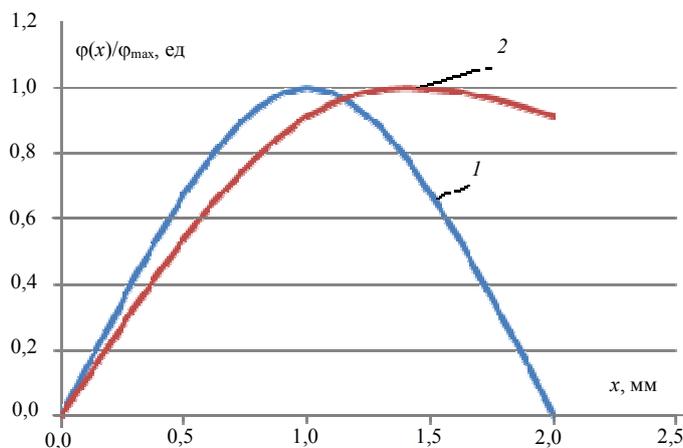


Рис. 3. Смещение максимума потенциала при введении заземленной опорной проводящей поверхности

2. Результаты исследования. Для предложенной расчетной схемы с введенной заземленной опорной проводящей поверхностью потенциал произвольной точки, имеющей координату x на границе раздела двух сред, может быть определен с помощью вспомогательной подсхемы, представленной на рис. 2, в:

$$\varphi(x) = \frac{I_3}{2\pi\gamma_2 l} \ln \frac{\sqrt{a^2 + (b+x)^2}}{\sqrt{a^2 + (b-x)^2}} + C = \frac{I}{\pi l(\gamma_1 + \gamma_2)} \ln \frac{\sqrt{a^2 + (b+x)^2}}{\sqrt{a^2 + (b-x)^2}} + C, \quad (7)$$

где $C = 0$.

Поскольку в решаемой задаче заданы граничные условия – $\varphi(x=0) = 0$, величина постоянной интегрирования может быть однозначно определена как $C = 0$.

Координата экстремума $\varphi_{\max}(x)$ определяется с помощью уравнения:

$$\begin{aligned} \frac{d\varphi}{dx} &= \frac{I}{\pi l(\gamma_1 + \gamma_2)} \cdot \ln \frac{d}{dx} \left(\ln \frac{\sqrt{a^2 + (b+x)^2}}{\sqrt{a^2 + (b-x)^2}} \right) = \\ &= \frac{I}{\pi l(\gamma_1 + \gamma_2)} \cdot \frac{2b(a^2 + b^2 - x^2)}{(a^2 + (b+x)^2)(a^2 + (b-x)^2)} = 0. \end{aligned} \quad (8)$$

В общем случае уравнение (8) имеет два решения:

$$x_{1,2} = \pm\sqrt{a^2 + b^2}. \quad (9)$$

Однако в рассматриваемой задаче x может принимать только положительные значения, следовательно, решение единственное $x = x_1$.

При этом для исходной схемы (см. рис. 1), в которой отсутствует искусственно введенная для расчета постоянной интегрирования C опорная поверхность, максимум потенциала наблюдается непосредственно в координате, соответствующей расположению кабеля, т.е. при $x = b$ в рассматриваемой системе координат. Это следует из исследования на экстремум функции изменения потенциала вдоль оси абсцисс, совпадающей с границей раздела двух диэлектриков, полученной для подсхемы, представленной на рис. 1, в:

$$\varphi(x) = \frac{I}{\pi l(\gamma_1 + \gamma_2)} \ln \frac{1}{\sqrt{a^2 + (b-x)^2}} + C. \quad (10)$$

Максимум $\varphi(x)$ определяется с помощью уравнения:

$$\begin{aligned} \frac{d\varphi}{dx} &= \frac{I}{\pi l(\gamma_1 + \gamma_2)} \cdot \ln \frac{d}{dx} \left(\ln \frac{1}{\sqrt{a^2 + (b-x)^2}} + C \right) = \\ &= \frac{I}{\pi l(\gamma_1 + \gamma_2)} \cdot \frac{b-x}{(a^2 + (b-x)^2)} = 0. \end{aligned} \quad (11)$$

Уравнение (11) имеет одно решение: $x = b$.

Следует отметить, что из исследования на экстремум функции изменения потенциала вдоль оси абсцисс, полученной для подсхемы, представленной на рис. 1, б, получается идентичный результат в связи с непрерывностью функции потенциала на границе раздела двух сред с различной удельной проводимостью.

Представленный на рис. 4 график иллюстрирует смещение координаты максимума $\varphi(x)$ от реального значения при введении опорной граничной поверхности.

Для общности выводов при построении графика использованы приведенные к величине a (данного расстояния от провода до границы раздела двух диэлектриков) величины: x_s/a (смещение максимума потенциала) и b/a (выбранное расстояние до опорной граничной поверхности).

При этом выполняется соотношение:

$$\frac{x_s}{a} = \sqrt{1 + \left(\frac{b}{a}\right)^2}. \quad (12)$$

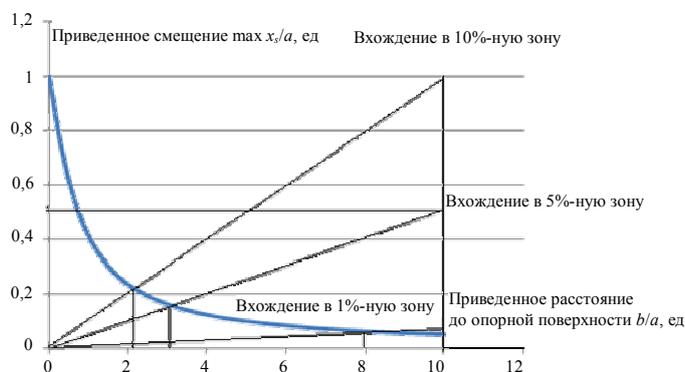


Рис. 4. Смещение координаты максимума $\varphi(x)$ от реального значения при введении опорной граничной поверхности

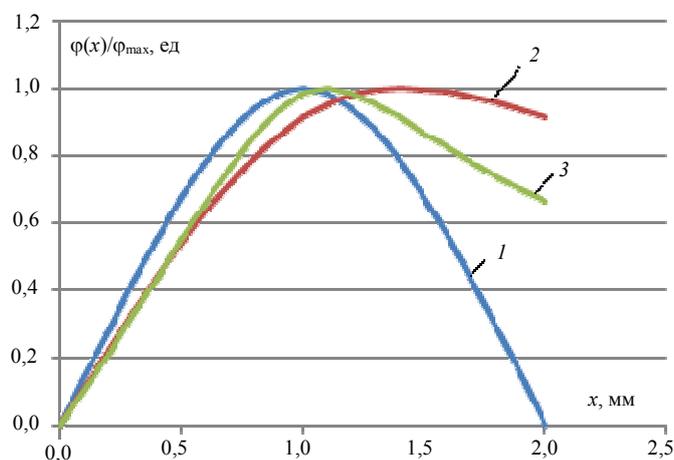


Рис. 5. Влияние соотношения между расстоянием от кабеля до границы раздела двух сред с различной удельной проводимостью и выбранным расстоянием до заземленной проводящей опорной поверхности

Как показывают исследования, вхождение в зону 10%-ного отклонения от реального положения максимума наступает при $b/a = 2,2$; в 5%-ную зону – при $b/a = 3,2$; в 1%-ную зону – при $b/a = 8$. Эти соотношения следует учитывать при выборе расстояния b до вводимой фиктивной опорной проводящей поверхности, имеющей нулевой потенциал.

Иллюстрация влияния полученных соотношений на точность расчета потенциала электрического поля приводится на рис. 5, где кривая 1 соответствует реальному распределению потенциала; кривая 2 соответствует распределению потенциала при введении опорной проводящей поверхности при $b/a = 1$; кривая 3 соответствует распределению потенциала при введении опорной проводящей поверхности при $b/a = 2,2$.

Таким образом, применение предложенного соотношения между расстоянием от кабеля до границы раздела двух сред с различной удельной проводимостью и выбранным расстоянием до заземленной проводящей опорной поверхности повышает точность решения на 30 %.

Выводы. Разработаны методы диагностики электрических полей кабелей постоянного тока, входящих в состав бортовых цифровых регуляторов авиационных двигателей, позволяющие решать проблему расчета распределения напряженности и потенциала электрического поля во внешней для кабеля среде.

Как показали результаты исследования, применение предложенного алгоритма анализа электрического поля кабеля постоянного тока, расположенного вблизи границ раздела двух сред с различной удельной электрической проводимостью, эффективно позволяет повышать точность методов диагностики электрических кабелей, входящих в состав систем автоматического управления авиационными двигателями.

Решение поставленной проблемы позволит повысить эффективность функционирования САУ и, соответственно, увеличить безопасность полета.

Библиографический список

1. Malloy D.J., Webb A.T., Kidman D.S. F-22/f119 Propulsion system ground and flight test analysis using modeling and simulation techniques // GT-2002-30001, ASME TURBO EXPO 2002; June 3–6. – Amsterdam, Netherlands, 2002. – 8 p.

2. Кузнецова Т.А., Губарев Е.А. Отказоустойчивые алгоритмы идентификации входной информации бортовой математической модели в составе системы автоматического управления авиационного двигателя // *Фундаментальные исследования*. – 2015. – № 6–1. – С. 39–43.

3. Кузнецова Т.А., Августинovich В.Г., Губарев Е.А. Алгоритмы диагностики и парирования отказов каналов измерения системы

автоматического управления авиационным двигателем // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2015. – № 16. – С. 5–14.

4. Borguet S., Léonard O. A Study on Sensor Selection for Efficient Jet Engine Health Monitoring // 12th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery. – Vol.: ISROMAC-2008-20072.

5. Кузнецова Т.А., Августинович В.Г. Применение нейронной сети для диагностики отказов датчиков каналов обратной связи САУ ГТД // Научно-технический вестник Поволжья. – 2017. – № 4. – С. 131–133.

6. Правила устройства электроустановок (ПУЭ) / Минэнерго России. – 7-е изд. – М., 2016. – 461 с. – URL: https://ohranatruda.ru/ot_biblio/normativ/data_normativ/7/7177/ (дата обращения: 15.11.2017).

7. Электрические кабели, провода и шнуры: справочник / сост. Н.И. Белоруссов [и др.]. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 536 с.

8. Келим Ю.М. Типовые элементы систем автоматического управления. – М.: ФОРУМ-ИНФРА-М, 2002. – 384 с.

9. Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры / под общ. ред. В.А. Шахнова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 568 с.

10. Кузнецова Т.А., Репп П.В. Разработка робастной бортовой информационно-измерительной управляющей системы // Научно-технический вестник Поволжья. – 2016. – № 3. – С. 120–122.

11. Августинович В.Г., Кузнецова Т.А. Повышение надежности систем автоматического управления газотурбинными двигателями с применением алгоритмических методов // Известия Томск. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326, № 9. – С. 68–77.

12. Repp P.V. The system of technical diagnostics of the industrial safety information network // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 803, iss. 012127. DOI: 10.1088/1742-6596/803/1/012127

13. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. – М.: Юрайт, 2013. – 317 с.

14. Теоретические основы электротехники: в 3 т. Т. 3 / К.С. Демирчян, Л.Р. Нейман [и др.]. – СПб.: Питер, 2003. – 377 с.

15. Татур Т.А. Основы теории электромагнитного поля: справоч. пособие. – М.: Высшая школа, 1989. – 271 с.

16. Теоретические основы электротехники. Т. 2: Нелинейные цепи и основы теории электромагнитного поля / под ред. П.А. Ионкина. – 2-е изд. – М.: Высшая школа, 1976. – 383 с.

17. Тамм И.Е. Основы теории электричества. – М.: Физматлит, 2003. – 615 с.

18. Смайт В. Электростатика и электродинамика. – М.: Иностранная литература, 1954. – 604 с. – URL: <http://padaread.com/?book=1416> (дата обращения: 15.11.2017).

19. Cheng David K. Fundamentals of Engineering Electromagnetics [electronic resource] // Reading, Mass Addison-Wesley Pub. Co. – 1993. – 488 p. – URL: <http://dl.offdownload.ir/ali/field%20and%20wave%20electromagnetics%20cheng.pdf> (дата обращения: 15.11.2017).

20. Grant I.S., Phillips W.R. Electromagnetism. – 2nd ed. – Manchester Physics, John Wiley & Sons, 2008. – 542 p. – URL: <https://leseprobe.buch.de/images-adb/04/9e/049e4344-1388-42a5-bc09-04dcb67e27e.pdf> (дата обращения: 15.11.2017).

References

1. Malloy D.J., Webb A.T., Kidman D.S. F-22/fl19 Propulsion system ground and flight test analysis using modeling and simulation techniques. GT-2002-30001, ASME TURBO EXPO 2002, June 3–6. Amsterdam, Netherlands, 2002. 8 p.

2. Kuznetsova T.A., Gubarev E.A. Otkazoustoichivye algoritmy identifikatsii vkhodnoi informatsii bortovoi matematicheskoi modeli v sostave sistemy avtomaticheskogo upravleniia aviatsionnogo dvigatel'ia [Fault-tolerant identification algorithms of input information for on-board mathematical models built-in the automatic control system of aircraft engines]. *Fundamental'nye issledovaniia*, 2015, no. 6-1, pp. 39-43.

3. Kuznetsova T.A., Avgustinovich V.G., Gubarev E.A. Algoritmy diagnostiki i parirovaniia otkazov kanalov izmereniia sistemy avtomaticheskogo upravleniia aviatsionnym dvigatelem [The algorithms of measuring channels' fault diagnostics and counteraction for automatic control system of aero-engines]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2015, no. 16, pp. 5-14.

4. Borguet S., Léonard O. A Study on Sensor Selection for Efficient Jet Engine Health Monitoring. *12th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery*, vol. ISROMAC-2008-20072.

5. Kuznetsova T.A., Avgustinovich V.G. Primenenie neuronnoi seti dlia diagnostiki otkazov datchikov kanalov obratnoi sviazi SAU GTD [The neural network application for fault diagnostics of feedback channels' sensor in automatic control systems of modern aircraft gas-turbine engines]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ia*, 2017, no. 4, pp. 131-133.

6. Pravila ustroistva elektroustanovok (PUE) [Rules of the electrical facilities' arrangement]. 2nd ed. Moscow: Minenergo Rossii, 2016, 461 p., available at: https://ohranatruda.ru/ot_biblio/normativ/data_normativ/7/7177/ (accessed 15 November 2017).

7. Belorussov N.I. et al. Elektricheskie kabeli, provoda i shnury: spravochnik [Electrical cables, wires and cords: directory]. Moscow: Energoatomizdat, 1988. 536 p.

8. Kelim Iu.M. Tipovye elementy sistem avtomaticheskogo upravleniia [Typical elements of automatic control systems]. Moscow: FORUM-INFRA-M, 2002. 384 p.

9. Konstruktorsko-tekhnologicheskoe proektirovanie elektronnoi apparatury [Development and technology design of electronics]. Ed. V.A. Shakhnova. Moscow: Moskovskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet imeni N.E. Baumana, 2005. 568 p.

10. Kuznetsova T.A., Repp P.V. Razrabotka robustnoi bortovoi informatsionno-izmeritel'noi upravliaiushchei sistemy [The robust on-board information and measurement control systems' development]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ia*, 2016, no. 3, pp. 120-122.

11. Avgustinovich V.G., Kuznetsova T.A. Povysenie nadezhnosti sistem avtomaticheskogo upravleniia gazoturbinnymi dvigateliami s primeneniem algoritmicheskikh metodov [Improving the reliability of automatic control systems of gas turbine engines with application of algorithmic methods]. *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*, 2015, vol. 326, no. 9, pp. 68-77.

12. Repp P.V. The system of technical diagnostics of the industrial safety information network. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, vol. 803, iss. 012127. DOI: 10.1088/1742-6596/803/1/012127

13. Bessonov L.A. Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. Elektromagnitnoe pole [Theoretical bases of electrical engineering. Electromagnetic field]. Moscow: Iurait, 2013. 317 p.

14. Demirchian K.S., Neiman L.R. [et al.]. Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. Tom 3 [Theoretical bases of electrical engineering. Vol. 3]. Saint Petersburg: Piter, 2003, vol. 3. 377 p.

15. Tatur T.A. *Osnovy teorii elektromagnitnogo polia: spravochnoe posobie* [Fundamentals of the theory of electromagnetic field: reference manual]. Moscow: Vysshaia shkola, 1989. 271 p.

16. *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki. Tom 2. Nelineinye tsepi i osnovy teorii elektromagnitnogo polia* [Theoretical bases of electrical engineering. Vol. 2. Nonlinear circuits and the foundations of the theory of the electromagnetic field]. 2nd ed. Ed. P.A. Ionkin. Moscow: Vysshaia shkola, 1976. 383 p.

17. Tamm I.E. *Osnovy teorii elektrichestva* [Fundamentals of the theory of electricity]. Moscow: Fizmatlit, 2003. 615 p.

18. Smit V. *Elektrostatika i elektrodinamika* [Static and Dynamic electricity]. Moscow: Inostrannaia literatura, 1954. 604 p, available at: <http://padaread.com/?book=1416> (accessed 15 November 2017).

19. Cheng David K. *Fundamentals of Engineering Electromagnetics. Reading, Mass Addison-Wesley Pub. Co*, 1993. 488 p., available at: <http://dl.offdownload.ir/ali/field%20and%20wave%20electromagnetics%20cheng.pdf> (accessed 15 November 2017).

20. Grant I.S., Phillips W.R. *Electromagnetism*. 2nd ed. Manchester Physics, John Wiley & Sons, 2008. 542 p., available at: <https://leseprobe.buch.de/images-adb/04/9e/049e4344-1388-42a5-bc09-204dcb67e27e.pdf> (accessed 15 November 2017).

Сведения об авторе

Кузнецова Татьяна Александровна (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Конструирование и технологии в электротехнике» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: tatianaakuznetsova@gmail.com).

About the author

Kuznetsova Tatiana Alexandrovna (Perm, Russian Federation) is a Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor Department of Constructional Design and Technologies in Electrical Engineering Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: tatianaakuznetsova@gmail.com).

Получено 30.01.2018