

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
ДОКЛАДЫ
АКАДЕМИИ НАУК
ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

2020

июль–сентябрь

№ 3 (48)



Выходит четыре раза в год

ISSN 1727-2769

Учредители

*Академия наук высшей школы России
Новосибирское отделение Академии наук высшей школы*

Главный редактор

А.Г. Вострецов, д-р техн. наук, проф., засл. деятель науки РФ

Заместитель главного редактора

В.Н. Васюков, д-р техн. наук, проф.

Редакционный совет

М. Грайцар, PhD, проф. (Словакия)
Д.В. Винников, д-р техн. наук, проф. (Эстония)
А. Загоскин, PhD (Великобритания)
Е.В. Ильичев, д-р физ.-мат. наук, проф. (Германия)
М.Н. Клыماش, д-р техн. наук, проф. (Украина)
К.Ю. Арутюнов, д-р физ.-мат. наук, проф.
А.В. Бурдаков, д-р физ.-мат. наук, проф.
И.С. Грузман, д-р техн. наук, проф.
А.О. Давидов, д-р техн. наук
В.П. Драгунов, д-р техн. наук, доц.
С.Л. Елистратов, д-р техн. наук
А.И. Легалов, д-р техн. наук, проф.
Г.В. Майер, д-р физ.-мат. наук, проф., засл. деятель науки РФ
В.Ю. Нейман, д-р техн. наук, проф.
О.В. Нос, д-р техн. наук, проф.
В.Я. Рудяк, д-р физ.-мат. наук, проф.
А.А. Спектор, д-р техн. наук, проф.
С.П. Халютин, д-р техн. наук, проф.
С.А. Харитонов, д-р техн. наук, проф.
В.Д. Юркевич, д-р техн. наук, проф.

Ответственный секретарь

Д.О. Соколова, канд. техн. наук

Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций в 2002 г. (свидетельство ПИ № 77-11517 от 04.01.2002 г.)

Адрес редакции, издателя: 630073, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, НГТУ, корп. 1, ком. 326, телефон: (383) 346-15-37, факс: (383) 346-02-09. Email: danvshrf@corp.nstu.ru

© Новосибирское отделение АН ВШ, 2020 г.

SCIENTIFIC JOURNAL

**PROCEEDINGS
OF THE RUSSIAN HIGHER SCHOOL
ACADEMY OF SCIENCES**

2020

July – September

№ 3 (48)



Journal is published quarterly

ISSN 1727-2769

Journal was established by

*Russian Higher Education Academy of Science
Novosibirsk Branch of Higher Education Academy of Science*

Chief Editor

A.G. Vostretsov, D.Sc. (Eng.), Prof., Honoured Science Worker of Russian Federation

Deputy Chief Editor

V.N. Vasyukov, D.Sc. (Eng.), Prof.

Editorial Council

M. Grajcar, PhD, Prof. (Slovakia)

D.V. Vinnikov, D.Sc. (Eng.), Prof. (Estonia)

A.M. Zagoskin, PhD (United Kingdom)

E.V. Ilyichev, D.Sc. (Phys.&Math.), Prof. (Germany)

M.M. Klymash, D.Sc. (Eng.), Prof. (Ukraine)

K.Yu. Arutyunov, D.Sc. (Phys.&Math.), Prof.

A.V. Burdakov, D.Sc. (Phys.&Math.), Prof.

I.S. Gruzman, D.Sc. (Eng.), Prof.

A.O. Davidov, D.Sc. (Eng.)

V.P. Dragunov, D.Sc. (Eng.), Assoc. Prof.

S.L. Elistratov, D.Sc. (Eng.)

A.I. Legalov, D.Sc. (Eng.), Prof.

G.V. Mayer, D.Sc. (Phys.&Math.), Prof., Honoured Science Worker of Russian Federation

V.Yu. Neyman, D.Sc. (Eng.), Prof.

O.V. Nos, D.Sc. (Eng.), Prof.

V.Ya. Rudyak, D.Sc. (Phys.&Math.), Prof.

A.A. Spector, D.Sc. (Eng.), Prof.

S.P. Khaljutin, D.Sc. (Eng.), Prof.

S.A. Haritonov, D.Sc. (Eng.), Prof.

V.D. Yurkevich, D.Sc. (Eng.), Prof.

Executive Secretary

D.O. Sokolova, C.Sc.(Eng.)

Editor and Publisher Address: Office 326, 20 bld. 1, K. Marx Prospect, Novosibirsk, 630073, Russian Federation. Tel: +7 (383) 346-15-37. Fax: +7 (383) 346-02-09. Email: danvshrf@corp.nstu.ru

© Novosibirsk Branch of Higher Education Academy of Science, 2020

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Вольхин Д.И., Девятков Г.Н.

Собственные параметры идеального четырехполюсника
для согласования маломощных усилителей 7

Девятков Г.Н.

Условия физической реализуемости типовой составляющей
 $z(y)$ -матрицы согласующего четырехполюсника общего вида
в сосредоточенном элементном базисе 13

Равад Дееб

Влияние угла атаки на теплообменные и гидродинамические
характеристики шахматного пучка труб каплевидной формы в
поперечном обтекании 21

Елиин А.И., Кожухов В.В., Елиин П.А.

Основы проектирования индуктивно-кондуктивных
нагревателей37

Калачиков А.А., Щелкунов Н.С.

Построение аналитической модели радиоканала ММО
на основе аппроксимации полной корреляционной матрицы52

Пальчикова И.Г., Карамшук Е.В., Смирнов Е.С.,

Пальчиков Е.И., Самойленко М.С.
Многофункциональный полупроводниковый осветитель62

CONTENTS

TECHNICAL SCIENCES

Volkhin D.I., Devyatkov G.N.

Own parameters of an ideal two-port for low noise matching7

Devyatkov G.N.

Conditions for the physical realizability of a typical component
z(y)-matrix of a matching quadrupole of a general form
in a concentrated elemental basis13

Deeb Rawad

Effect of angle of attack on heat transfer and hydrodynamic
characteristics for staggered drop-shaped tubes bundle
in cross-flow21

CONTENTS

Elshin A.I., Kozhukhov V.V., Elshin P.A.

Fundamentals of designing inductive-conductive heaters.....37

Kalachikov A.A., Shelkunov N.S.

Construction of analytical wireless MIMO channel model
based on full correlation matrix approximation52

Palchikova I.G., Karamshuk E.V., Smirnov E.S.,

Palchikov E.I., Samoilenko M.S.

Multi-functional semiconductor lighting.....62

УДК 621.372

**СОБСТВЕННЫЕ ПАРАМЕТРЫ ИДЕАЛЬНОГО ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКА
ДЛЯ СОГЛАСОВАНИЯ МАЛОШУМЯЩИХ УСИЛИТЕЛЕЙ****Д.И. Вольхин¹, Г.Н. Девятков¹**¹*Новосибирский государственный технический университет*

Задача широкополосного согласования активных элементов по коэффициенту шума неизбежно встречается при проектировании широкополосных малошумящих усилителей СВЧ.

Несмотря на то что задача отличается от классической задачи широкополосного согласования иммитансов источника сигнала и нагрузки, ее можно свести к виду, пригодному для применения методов решения классической задачи. С этой целью в данной работе выведены собственные параметры реактивного четырехполосника, согласующего активные элементы по коэффициенту шума во всей полосе частот, где определены данные для расчета этого коэффициента. Собственные параметры такого четырехполосника, с одной стороны, позволяют строить методы синтеза входных согласующих цепей малошумящих усилителей и других устройств, где требуется согласование по коэффициенту шума, с другой стороны, собственные параметры позволяют строить оценки максимально достижимой полосы пропускания для согласующей цепи заданной сложности.

Ключевые слова: идеальный согласующий четырехполосник, параметры холостого хода, параметры короткого замыкания, согласование по коэффициенту шума.

DOI: 10.17212/1727-2769-2020-3-7-12

Введение

Проектирование малошумящих усилителей связано с решением задачи согласования. Особое внимание уделяется разработке входной согласующей цепи, так как именно она во многом определяет уровень коэффициента шума всего усилителя. Существует много работ, посвященных методам синтеза согласующих цепей малошумящих усилителей [1–3]. Достоинством этих работ является их интеграция с современными системами автоматизированного проектирования, однако данные методы не позволяют оценить качество полученного решения. Этот недостаток может быть исправлен с помощью собственных параметров идеального четырехполосника согласующего активный элемент по коэффициенту шума, определенных в данной работе.

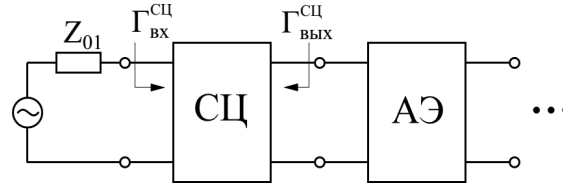
Классическая задача широкополосного согласования формулируется следующим образом: обеспечить передачу максимальной мощности от источника сигнала в нагрузку в заданной полосе рабочих частот. При этом иммитансы источника сигнала и нагрузки могут быть произвольными. Для реактивной согласующей цепи классическая задача в терминах рисунка выглядит так:

$$\max \left(\left| \Gamma_{\text{вх}}^{\text{СП}}(f) \right|^2 \right) \rightarrow \min, \quad (1)$$

где $\Gamma_{\text{вх}}^{\text{СП}}$ – коэффициент отражения согласующей цепи по входу; f – частотные точки из заданного диапазона рабочих частот.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект № FSUN-2020-0007

© 2020 Д.И. Вольхин, Г.Н. Девятков



К формулировке задачи широкополосного согласования по коэффициенту шума

To the formulation of the problem of broadband noise figure matching

Ранее в работе [4] для решения этой задачи были определены собственные параметры реактивного согласующего четырехполюсника.

Задачу широкополосного согласования по коэффициенту шума формулируют как обеспечение на входе активного элемента оптимального значения коэффициента отражения, соответствующего минимальному коэффициенту шума активного элемента.

Входные согласующие цепи малошумящих усилителей проектируют из реактивных элементов, поэтому задачу широкополосного согласования по коэффициенту шума (см. рисунок) можно записать следующим образом:

$$\Gamma_{\text{ВЫХ}}^{\text{СЦ}}(f) = \Gamma_{\text{ОПТ}}(f), \quad (2)$$

где $\Gamma_{\text{ВЫХ}}^{\text{СЦ}}$ – коэффициент отражения согласующей цепи по выходу, $\Gamma_{\text{ОПТ}}$ – коэффициент отражения активного элемента, при котором достигается минимальный коэффициент шума.

Несмотря на то что задача (2) отличается от классической задачи широкополосного согласования иммитансов источника сигнала и нагрузки, ее можно свести к виду, пригодному для применения методов решения классической задачи.

С этой целью в данной работе определяются собственные параметры реактивного четырехполюсника, согласующего активный элемент по коэффициенту шума, связывающие произвольные иммитансы источника сигнала и нагрузки.

1. Собственные параметры реактивного четырехполюсника для согласования по коэффициенту шума

Рабочими параметрами согласующих четырехполюсников являются коэффициент передачи по напряжению, коэффициенты отражения по входу и выходу, которые определяются через z - или y -параметры четырехполюсников [5]:

$$\begin{aligned} t &= \frac{2 \cdot \sqrt{\text{Re}(Z_{01}) \text{Re}(Z_{01})} \cdot z_{21}}{(Z_{01} + z_{11})(Z_{01} + z_{22}) - z_{21}^2}, & t &= \frac{-2 \cdot \sqrt{\text{Re}(Y_{01}) \text{Re}(Y_{01})} \cdot y_{21}}{(Y_{01} + y_{11})(Y_{01} + y_{22}) - y_{21}^2}, \\ \Gamma_{\text{ВХ}} &= \frac{(z_{22} + Z_{02})(z_{11} - Z_{01}^*) - z_{21}^2}{(z_{22} + Z_{02})(z_{11} + Z_{01}) - z_{21}^2}, & \Gamma_{\text{ВЫХ}} &= \frac{(y_{11} + Y_{01})(y_{22} - Y_{02}^*) - y_{21}^2}{(y_{11} + Y_{01})(y_{22} + Y_{02}) - y_{21}^2}, \\ \Gamma_{\text{ВЫХ}} &= \frac{(z_{11} + Z_{01})(z_{22} - Z_{02}^*) - z_{21}^2}{(z_{11} + Z_{01})(z_{22} + Z_{02}) - z_{21}^2}, & \Gamma_{\text{ВХ}} &= \frac{(y_{22} + Y_{02})(y_{11} - Y_{01}^*) - y_{21}^2}{(y_{22} + Y_{02})(y_{11} + Y_{01}) - y_{21}^2}, \end{aligned} \quad (3)$$

где Z_{01}, Z_{02} (Y_{01}, Y_{02}) – импедансы (адмиттансы) источника сигнала и нагрузки; Z_{01}^*, Z_{02}^* (Y_{01}^*, Y_{02}^*) – комплексно сопряженные импедансы (адмиттансы) источника сигнала и нагрузки.

Так как в случае согласования по коэффициенту шума необходимо обеспечить требуемое значение коэффициента отражения по выходу, выразим собственные параметры четырехполюсника через коэффициент отражения по выходу и коэффициент передачи по напряжению из (3).

В случае реактивного четырехполюсника для широкополосного согласования по коэффициенту шума вместо параметров $|\Gamma_{\text{вых}}|$ и $\arg(\Gamma_{\text{вых}})$ необходимо использовать параметры оптимального коэффициента отражения $|\Gamma_{\text{опт}}^{\text{АЭ}}|$ и $\arg(\Gamma_{\text{опт}})$, поставляемые производителем транзисторов (или других активных элементов) в составе *.s2p файла, используемого для проектирования маломощного усилителя. Тогда собственные z-параметры четырехполюсника примут вид:

$$\begin{aligned} z_{11} &= -j \operatorname{Im}(Z_{01}) + j \operatorname{Re}(Z_{01}) \frac{\cos(\arg(t)) - |\Gamma_{\text{опт}}| \cos(\arg(\Gamma_{\text{опт}}) - \arg(t))}{\sin(\arg(t)) + |\Gamma_{\text{опт}}| \sin(\arg(\Gamma_{\text{опт}}) - \arg(t))}, \\ z_{22} &= -j \operatorname{Im}(Z_{02}) + j \operatorname{Re}(Z_{02}) \frac{\cos(\arg(t)) + |\Gamma_{\text{опт}}| \cos(\arg(\Gamma_{\text{опт}}) - \arg(t))}{\sin(\arg(t)) + |\Gamma_{\text{опт}}| \sin(\arg(\Gamma_{\text{опт}}) - \arg(t))}, \\ z_{21} &= \frac{j \cdot \sqrt{\operatorname{Re}(Z_{01}) \operatorname{Re}(Z_{02})} \cdot |t|}{\sin(\arg(t)) + |\Gamma_{\text{опт}}| \sin(\arg(\Gamma_{\text{опт}}) - \arg(t))}. \end{aligned} \quad (4)$$

Аналогично для y-параметров:

$$\begin{aligned} y_{11} &= -j \operatorname{Im}(Y_{01}) + j \operatorname{Re}(Y_{01}) \frac{\cos(\arg(t)) - |\Gamma_{\text{опт}}| \cos(\arg(\Gamma_{\text{опт}}) - \arg(t))}{\sin(\arg(t)) + |\Gamma_{\text{опт}}| \sin(\arg(\Gamma_{\text{опт}}) - \arg(t))}, \\ y_{22} &= -j \operatorname{Im}(Y_{02}) + j \operatorname{Re}(Y_{02}) \frac{\cos(\arg(t)) + |\Gamma_{\text{опт}}| \cos(\arg(\Gamma_{\text{опт}}) - \arg(t))}{\sin(\arg(t)) + |\Gamma_{\text{опт}}| \sin(\arg(\Gamma_{\text{опт}}) - \arg(t))}, \\ y_{21} &= \frac{j \cdot \sqrt{\operatorname{Re}(Y_{01}) \operatorname{Re}(Y_{02})} \cdot |t|}{\sin(\arg(t)) + |\Gamma_{\text{опт}}| \sin(\arg(\Gamma_{\text{опт}}) - \arg(t))}. \end{aligned} \quad (5)$$

Так как в *.s2p файлах шумовые параметры активного элемента приведены в расчете на стандартное значение волнового сопротивления источника сигнала 50 Ом и согласующая по коэффициенту шума цепь является входной цепью маломощного усилителя, то в качестве Z_{01} и Z_{02} нужно использовать значение 50 Ом. Однако параметры (4) и (5) позволяют получить собственные параметры и при произвольных иммитансах источника сигнала и нагрузки.

2. Апробация результатов

Продemonстрируем корректность собственных параметров реактивного четырехполюсника на примере транзистора CE3512, для которого производителем предоставлены данные для проектирования в формате *.s2p файла с шумовыми параметрами, представленными в таблице.

Шумовые параметры транзистора CE3512
Noise parameters of CE3512

F GHz	Fmin dB	Gammaopt		Rn/50
		MAG	ANG	
8	0,28	0,554	70,9	0,136
9	0,3	0,508	84,1	0,112
10	0,34	0,452	98,5	0,096
11	0,37	0,405	113,6	0,062
12	0,42	0,361	130,4	0,044
13	0,46	0,309	147,9	0,036
14	0,49	0,301	167	0,03

Подставим значение амплитуды и угла оптимального коэффициента отражения в выражения (4) или (5). При этом $Z_{01} = Z_{02} = 50$, аргумент коэффициента передачи по напряжению может быть задан произвольно. Это значит, что в общем случае определенные для собственных параметров выражения применимы в методах синтеза согласующих цепей с заданной фазовой характеристикой [6]. В данном примере аргумент коэффициента передачи по напряжению изменяется по линейному закону:

$$\arg(t(f)) = -kf,$$

где k – линейный коэффициент. Так как согласующая цепь является реактивной, амплитуда коэффициента передачи по напряжению жестко связана с амплитудой коэффициента отражения:

$$|t|^2 = 1 - |\Gamma_{\text{вых}}|^2.$$

Сформировав собственные параметры реактивного четырехполосника, вычислим коэффициент отражения согласующей цепи по выходу (3). Затем найдем коэффициент шума транзистора вместе с согласующей цепью в виде идеального реактивного четырехполосника по формуле

$$F = F_{\min} + 4 \frac{Rn}{Z_0} \frac{|\Gamma_{\text{вых}} - \Gamma_{\text{опт}}|^2}{|1 + \Gamma_{\text{опт}}|^2 (1 - |\Gamma_{\text{вых}}|^2)}.$$

Значения коэффициента шума усилителя полностью совпадают со значениями минимального коэффициента шума Fmin из таблицы во всех заданных частотных точках.

Заключение

Выражения для собственных параметров соответствуют идеальному реактивному четырехполоснику, согласующему активный элемент по коэффициенту шума во всех частотных точках, где определены шумовые параметры. Выражения (4) и (5) определяют вид, к которому должны стремиться собственные параметры входной согласующей цепи малошумящего усилителя и могут быть положены в основу различных синтезирующих процедур [7], в том числе методов синтеза цепей с заданной фазовой характеристикой [6].

ЛИТЕРАТУРА

1. **Бабак Л.И., Поляков А.Ю.** Автоматизированное проектирование малошумящих транзисторных СВЧ усилителей с реактивными согласующими цепями // Доклады ТУСУР. – 1997. – Т. 1, № 1. – С. 94–108.
2. **Sawarkar K.G., Tuckley K.** Negative image matching technique and its realization for ultra-wide band low noise amplifier // *China Communications*. – 2019. – Vol. 16, iss. 3. – P. 143–153.
3. Constant loss contours of matching networks for millimeter-wave LNA design / C.L. Ko, C.H. Li, M.C. Kuo, D.C. Chang // *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. – 2016. – Vol. 26, N 11. – P. 939–941.
4. **Девятков Г.Н.** Рабочие и собственные параметры реактивного согласующего четырехполосника // Доклады Сибирского отделения Академии наук высшей школы. – 2000. – № 2. – С. 48–52.
5. **Маттей Д.Л., Янг Л., Джонс Е.М.Т.** Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи. Т. 1. – М.: Связь, 1971. – 440 с.
6. **Вольхин Д.И., Девятков Г.Н.** Метод синтеза согласующих устройств с заданными фазовыми характеристиками // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2016. – № 4 (33). – С. 49–60. – DOI: 10.17212/1727-2769-2016-4-49-60.
7. **Девятков Г.Н.** Автоматизированный синтез широкополосных согласующих устройств, связывающих произвольные иммитансы источника сигнала и нагрузки // Научный вестник НГТУ. – 2004. – № 1 (16). – С. 155–165.

OWN PARAMETERS OF AN IDEAL TWO-PORT FOR LOW NOISE MATCHING**Volkhin D.I., Devyatkov G.N.***Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia*

The problem of broadband matching of active elements in terms of noise figure is inevitably encountered in the design of broadband low-noise microwave amplifiers. Despite the fact that this problem differs from the classical problem of broadband matching of signal source and load, it can be reduced to a form suitable for applying methods for solving the classical problem. For this purpose, in this work, the own parameters of a reactive two-port network are derived that match active elements in terms of noise figure in the entire frequency band, where the data for calculating this coefficient are determined. The own parameters of such a two-port network, on the one hand, make it possible to construct methods for the synthesis of input matching circuits of low-noise amplifiers and other devices where low noise matching is required. On the other hand, the own parameters allow one to construct estimates of the maximum achievable bandwidth for a matching circuit of a given complexity.

Keywords: Ideal matching two-port network, own parameters, noise figure matching.

DOI: 10.17212/1727-2769-2020-3-7-12

REFERENCES

1. Babak L.I., Polyakov A.Yu. Avtomatizirovannoe proektirovanie maloshumyashchikh tranzistornykh SVCh usilitelei s reaktivnymi soglasuyushchimi tsepyami [Computer aided design of low-noise transistor microwave amplifiers with reactive matching circuits]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki = Proceedings of TUSUR University*, 1997, vol. 1, no. 1, pp. 94–108.
2. Sawarkar K.G., Tuckley K. Negative image matching technique and its realization for ultra-wide band low noise amplifier. *China Communications*, 2019, vol. 16, iss. 3, pp. 143–153.
3. Ko C.L., Li C.H., Kuo M.C., Chang D.C. Constant loss contours of matching networks for millimeter-wave LNA design. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2016, vol. 26, no. 11, pp. 939–941.
4. Devyatkov G.N. Rabochie i sobstvennye parametry reaktivnogo soglasuyushchego chetyrekhpolyusnika [Operating and own parameters of matching two-ports]. *Doklady Sibirskogo*

- otdeleniya Akademii nauk vysshei shkoly = Proceedings of Siberian Branch of the Russian Higher School Academy of Sciences*, 2000, no. 2, pp. 48–52.
5. Matthaei G.L., Young L., Jones E.M.T. *Microwave filters, impedance-matching networks, and coupling structures*. New York, McGraw-Hill, 1964 (Russ. ed.: Mattei D.L., Yang L., Dzhons E.M.T. *Fil'try SVCh, soglasuyushchie tsepi i tsepi svyazi*. Т. 1. Moscow, Svyaz' Publ., 1971. 440 p.).
 6. Volkhin D.I., Devyatkov G.N. Metod sinteza soglasuyushchikh ustroystv s zadannymi fazovymi kharakteristikami [Method of synthesis of matching devices with predetermined phase response]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2016, no. 4 (33), pp. 49–60. DOI: 10.17212/1727-2769-2016-4-49-60.
 7. Devyatkov G.N. Avtomatizirovannyi sintez shirokopolosnykh soglasuyushchikh ustroystv, svyazyvayushchikh proizvol'nye immitansy istochnika signala i nagruzki [Automated synthesis of broad-band matching devices connecting arbitrary impedance of signals source and load]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2004, no. 1 (16), pp. 155–165.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Вольхин Дмитрий Игоревич – родился в 1990 году, канд. техн. наук, доцент кафедры конструирования и технологии радиоэлектронных средств, НГТУ. Область научных интересов: автоматизированный синтез и проектирование активных и пассивных устройств СВЧ. Опубликовано 26 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: d.volkhin@ngs.ru).

Volkhin Dmitry Igorevich (b. 1990) – Candidate of Sciences (Eng.), associate professor of the Department of Design and Technology of Electronic Devices in the Novosibirsk State Technical University. His research interests are focused on automated synthesis and design of active and passive microwave devices. He is the author of 26 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: d.volkhin@ngs.ru).



Девятков Геннадий Никифорович – родился в 1945 году, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры конструирования и технологии радиоэлектронных средств Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: автоматизированный синтез активных и пассивных устройств СВЧ. Опубликовано 190 научных работ, в том числе две монографии. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. Email: devyatkovgn@mail.ru).

Devyatkov Gennadii Nikiforovich (b. 1945) – Doctor of Science (Eng.), Associate Professor, Professor at the Department of Design and Technology of Electronic Devices in the Novosibirsk State Technical University. Research interests: automated synthesis and design of active and passive microwave devices. He is the author of over 150 scientific papers and 2 monographs. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: devyatkovgn@mail.ru).

*Статья поступила 16 августа 2020 г.
Received August 16, 2020*

To references:

Volkhin D.I., Devyatkov G.N. Sobstvennyye parametry ideal'nogo chetyrekhpolusnika dlya soglasovaniya maloshumyashchikh usilitelei [Own parameters of an ideal two-port for low noise matching]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2020, no. 3 (48), pp. 7–12. DOI: 10.17212/1727-2769-2020-3-7-12.

УДК 621.372.0

**УСЛОВИЯ ФИЗИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗУЕМОСТИ ТИПОВОЙ
СОСТАВЛЯЮЩЕЙ $z(y)$ -МАТРИЦЫ СОГЛАСУЮЩЕГО
ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКА ОБЩЕГО ВИДА В СОСРЕДОТОЧЕННОМ
ЭЛЕМЕНТНОМ БАЗИСЕ**

Г.Н. Девятков*Новосибирский государственный технический университет*

При решении задач широкополосного согласования очень часто появляется необходимость в определенной форме амплитудно-частотной характеристики. В связи с этим возникает задача синтеза широкополосных согласующих устройств, обладающих одновременно корректирующими свойствами, т.е. имеющих заданную частотную зависимость коэффициента преобразования мощности в рабочей полосе частот. Использование широкополосных реактивных согласующе-корректирующих цепей в большинстве практических случаев затруднено из-за отраженной мощности. Это приводит к проблеме синтеза широкополосных согласующе-корректирующих цепей при произвольных иммитансах источника сигнала и нагрузки в элементном базисе общего вида, содержащем наряду с реактивными активными элементами, которая в должной мере не решена. В связи с этим возникает необходимость в нахождении условий физической реализуемости типовой составляющей иммитансной матрицы четырехполосника общего вида, содержащей полюсы в левой полуплоскости комплексных частот. В работе определены необходимые и достаточные условия физической реализуемости иммитансной матрицы типовой составляющей подкласса четырехполосников общего вида в сосредоточенном элементном электрическом базисе, когда полюсы собственных функций в фостеровском представлении могут находиться в левой полуплоскости комплексных частот, исключаящие мнимую и вещественную оси. Это позволяет осуществить с единых позиций синтез широкополосных диссипативных согласующих, согласующе-корректирующих цепей и согласованных аттенуаторов в элементном базисе общего вида при произвольных иммитансах источника сигнала и нагрузки.

Ключевые слова: широкополосное согласование, коррекция, иммитансные матрицы, собственные параметры, условия физической реализуемости.

DOI: 10.17212/1727-2769-2020-3-13-20

Введение

При построении широкополосных радиотехнических трактов наряду с решением проблемы широкополосного согласования возникает необходимость в коррекции сильной частотной зависимости коэффициента преобразования мощности используемых полупроводниковых приборов (транзисторов, диодов) в рабочей полосе частот. Этой задаче, по существу относящейся к задачам синтеза амплитудных выравнителей и тесно связанной с общей проблемой синтеза электрических цепей, частотные характеристики которых приближенно воспроизводят заданные зависимости в определенной области частот, посвящено большое количество публикаций [1–3]. Следует отметить, что раздельное решение задач широкополосного согласования и коррекции, как правило, приводит к более сложному варианту построения устройств. В связи с этим возникает проблема синтеза широкополосных согласующих устройств, обладающих одновременно корректирующими свойствами, т.е. имеющих заданную частотную зависимость коэффициента преобразования мощности в рабочей полосе частот. Использование широкополосных реактивных согласующе-корректирующих цепей [2, 4] позволяет реали-

зывать большую широкополосность устройств по сравнению с отдельным решением задач широкополосного согласования и коррекции, но в большинстве практических случаев затруднено из-за отраженной мощности. Это, в свою очередь, приводит к проблеме синтеза широкополосных согласующе-корректирующих цепей при произвольных иммитансах источника сигнала и нагрузки в элементном базисе общего вида, содержащем наряду с реактивными активные элементы, которая в должной мере не решена. В известных публикациях в основном используется параметрический подход к синтезу диссипативных согласующе-корректирующих цепей при простейших нагрузочных иммитансах, что связано со сложностью решаемой проблемы.

Целью работы является определение необходимых и достаточных условий, физической реализуемости иммитансных матриц, позволяющих осуществить с единых позиций синтез широкополосных диссипативных согласующих и согласующе-корректирующих цепей и согласованных аттенуаторов в элементном базисе общего вида при произвольных иммитансах источника сигнала и нагрузки.

1. Метод решения

В данной работе ограничим класс решаемых задач сосредоточенным элементным базисом. А также учтем результативность подхода, используемого при автоматизированном синтезе широкополосных реактивных согласующих четырехполюсников, связывающих произвольные иммитансы источника сигнала и нагрузки и позволяющего найти его собственные функции, имеющие минимальную сложность, при которых коэффициент преобразования мощности удовлетворяет поставленным требованиям с одновременным выполнением ограничений, обеспечивающих физическую реализуемость [5]. Тогда так же, как и в случае чисто реактивного четырехполюсника, имеет смысл использовать при синтезе выражения для собственных параметров идеального четырехполюсника в элементном базисе общего вида, согласующего произвольные иммитансы источника сигнала и нагрузки, представляющие собой бесконечные быстросходящиеся ряды в виде первой и второй формы Фостера, что позволяет синтезировать устройства, имеющие сравнительно небольшое число элементов с рабочими характеристиками, близкими к предельным [6]. Это приводит к необходимости нахождения условий физической реализуемости типовой составляющей иммитансной матрицы в элементном базисе общего вида.

Следует отметить, что в сосредоточенном элементном базисе реализация по Фостеру применима к трем типам двухэлементных цепей, содержащих LC , LR , CR элементы, т. е. когда полюсы функций сопротивления (проводимости) расположены только на мнимой или отрицательной части вещественной оси комплексных частот [7]. В общем же случае для реализации цепей, содержащих три элемента LCR , метод Фостера применим лишь при определенных условиях. Это связано с тем, что разложение сопротивления (проводимости), являющегося положительной вещественной функцией на сумму простых составляющих не гарантирует, что эти составляющие также являются положительными вещественными функциями. В то же время, как следует из систем уравнений для собственных параметров [6], полюсы собственных функций синтезируемого согласующего четырехполюсника в элементном базисе общего вида могут находиться в любом месте левой полуплоскости комплексной частоты. В связи с этим возникает необходимость в нахождении условий, при которых разложение по Фостеру применимо и для общего случая.

Учитывая, что полюсы пассивной цепи, лежащие в левой полуплоскости комплексной частоты кроме отрицательной части вещественной оси, являются комплексно-сопряженными парами, в работе [7] показано, что для физической реализуемости сопротивления $z(s)$ -соответствующего такой паре

$$z(s) = \frac{k_v}{s - s_v} + \frac{k_v^*}{s - s_v^*}, \quad (1)$$

где $k_v = \alpha_v + j\beta_v$ – вычет относительно полюса при $s_v = -\sigma_v + j\omega_v$, на составляющие вычета k_v должны быть наложены следующие ограничения:

$$\left. \begin{array}{l} \alpha_v \geq 0 \\ |\beta_v| \leq \frac{\alpha_v \sigma_v}{\omega_v} \end{array} \right\}, \quad (2)$$

при этом σ_v и ω_v являются положительными величинами по определению.

Используя эти результаты, вначале определим условия физической реализуемости, которым должна удовлетворять совокупность функций $z_{11}^v(s)$, $z_{21}^v(s)$, $z_{22}^v(s)$ ($y_{11}^v(s)$, $y_{21}^v(s)$, $y_{22}^v(s)$) типовой оставляющей

$$\mathbf{z}_v(\mathbf{y}_v) = \mathbf{z}'_v(\mathbf{y}'_v) + \mathbf{z}''_v(\mathbf{y}''_v), \quad (3)$$

где

$$\mathbf{z}'_v(\mathbf{y}'_v) = \begin{bmatrix} k_{11}^v / (s - s_v) & (-)k_{12}^v / (s - s_v) \\ (-)k_{21}^v / (s - s_v) & k_{22}^v / (s - s_v) \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{z}''_v(\mathbf{y}''_v) = \begin{bmatrix} (k_{11}^v)^* / (s - s_v^*) & (-)(k_{12}^v)^* / (s - s_v^*) \\ (-)(k_{21}^v)^* / (s - s_v^*) & (k_{22}^v)^* / (s - s_v^*) \end{bmatrix},$$

$\mathbf{z}(\mathbf{y})$ – матрицы четырехполюсника общего вида, содержащей полюсы в точках s_v и s_v^* ($s_v = -\sigma_v + j\omega_v$) левой полуплоскости комплексных частот. Матрицы $\mathbf{z}'_v(\mathbf{y}'_v)$, $\mathbf{z}''_v(\mathbf{y}''_v)$, также как и в более простых случаях, могут быть реализованы в виде четырехполюсников общего вида (рис. 1), соответствующая $\mathbf{z}_{об}(\mathbf{y}_{об})$ -матрица которых имеет вид

$$\mathbf{z}_{об}(\mathbf{y}_{об}) = \begin{bmatrix} K_{11}^\ell f & K_{12}^\ell f \\ K_{21}^\ell f & K_{22}^\ell f \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где под f следует понимать функции S , $1/S$, $2S/(S^2 - S_v^2)$.

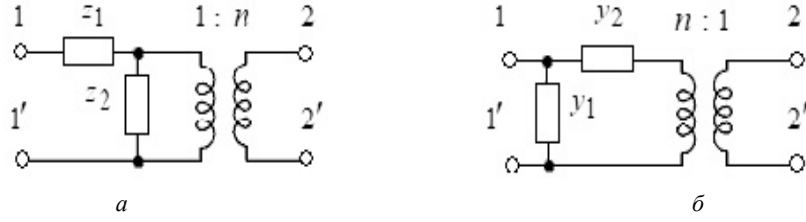


Рис. 1 – Четырехполосники общего вида

Fig. 1 – General view quadrupoles

Элементы четырехполосников могут быть определены по следующим формулам:

$$\begin{aligned}
 z_1(y_1) &= (K_{11}^{\ell} - K)f, \\
 z_2(y_2) &= Kf, \\
 n &= K_{22}^{\ell} / K_{12}^{\ell}, \\
 K &= (K_{12}^{\ell})^2 / K_{22}^{\ell}.
 \end{aligned} \tag{5}$$

Тогда, используя формулы (5), запишем следующие уравнения:

$$n = \frac{\alpha_{22}^v + j\beta_{22}^v}{\alpha_{21}^v + j\beta_{21}^v}; \tag{6}$$

$$\alpha_{11}^v + j\beta_{11}^v - \frac{\alpha_{21}^v + j\beta_{21}^v}{n} = \alpha_1 + j\beta_1; \tag{7}$$

$$\frac{\alpha_{21}^v + j\beta_{21}^v}{n} = \alpha_2 + j\beta_2. \tag{8}$$

Считая коэффициент трансформации n идеального трансформатора действительным, можно из (6)–(8) получить соотношения:

$$n = \alpha_{22}^v / \alpha_{21}^v, \quad n = \beta_{22}^v / \beta_{21}^v; \tag{9}$$

$$\alpha_{11}^v - \alpha_{21}^v / n = \alpha_1, \quad \beta_{11}^v - \beta_{21}^v / n = \beta_1; \tag{10}$$

$$\alpha_{21}^v / n = \alpha_2, \quad \beta_{21}^v / n = \beta_2, \tag{11}$$

из которых следует, что n будет иметь такой же знак, что и действительная часть вычета k_{21}^v .

Уравнения (10) и (11) с учетом (9) и (2) могут быть записаны в виде соотношений:

$$\alpha_{11}^v \geq 0, \quad \alpha_{22}^v \geq 0, \quad \alpha_{11}^v \alpha_{22}^v - (\alpha_{21}^v)^2 \geq 0; \tag{12}$$

$$|\beta_{21}^v| \leq |\alpha_{21}^v| \frac{\sigma_v}{\omega_v}, \quad \beta_{22}^v = \beta_{21}^v \frac{\alpha_{22}^v}{\alpha_{21}^v}; \tag{13}$$

$$\left| \beta_{11}^y - \frac{(\beta_{21}^y)^2}{\beta_{22}^y} \right| \leq \left(\alpha_{11}^y - \frac{(\alpha_{21}^y)^2}{\alpha_{22}^y} \right) \frac{\sigma_v}{\omega_v}, \quad (14)$$

являющихся искомыми необходимыми условиями физической реализуемости.

При реализации матрицы (3) в форме четырехполосников общего вида (рис. 1) их составляющие $z_1(s)$ и $z_2(s)$ будут иметь вид (рис. 2, а), а $y_1(s)$ и $y_2(s)$ – (рис. 2, б), элементы которых могут быть найдены по формулам:

$$C_i^z(L_i^y) = 1/(2\alpha_i), \quad G_i^z(R_i^y) = (\sigma_v + \frac{\beta_i}{\alpha_i} \omega_v) / 2\alpha_i; \quad (15)$$

$$L_i^z(C_i^y) = A, \quad R_i^z(G_i^y) = A(\sigma_v - \frac{\beta_i}{\alpha_i} \omega_v), \quad (16)$$

где $i = 1, 2$;

$$A = \frac{2\alpha_i}{\omega_v^2 \left(1 + \frac{\beta_i^2}{\alpha_i^2} \right)};$$

$$\alpha_1 = \alpha_{11}^y - \frac{(\alpha_{21}^y)^2}{\alpha_{22}^y}, \quad \beta_1 = \beta_{11}^y - \frac{(\beta_{21}^y)^2}{\beta_{22}^y};$$

$$\alpha_2 = \frac{(\alpha_{21}^y)^2}{\alpha_{22}^y}, \quad \beta_2 = \frac{(\beta_{21}^y)^2}{\beta_{22}^y}.$$

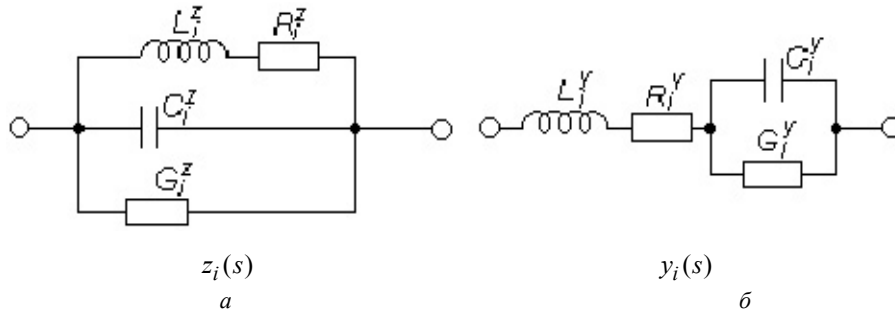


Рис. 2 – Структуры цепей $z_i(s)$ и $y_i(s)$

Fig. 2 – Structures of circuits $z_i(s)$ and $y_i(s)$

Таким образом, структура $\mathbf{z}(y)$ -матриц четырехполосников, являющихся подклассом четырехполосников общего вида, когда полюсы функций $z_{11}(s)$, $z_{22}(s)$, $z_{21}(s)$ ($y_{11}(s)$, $y_{22}(s)$, $y_{21}(s)$) могут находиться в левой полуплоскости комплексных частот, исключая мнимую и вещественную оси, запишутся в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} z_{11}(s)(y_{11}(s)) &= \sum_{v=1}^m \left(\frac{k_{11}^v}{s-s_v} + \frac{(k_{11}^v)^*}{s-s_v^*} \right) + z_{110}(s)(y_{110}(s)) \\ z_{21}(s)(y_{21}(s)) &= (-) \sum_{v=1}^m \left(\frac{k_{21}^v}{s-s_v} + \frac{(k_{21}^v)^*}{s-s_v^*} \right) \\ z_{22}(s)(y_{22}(s)) &= \sum_{v=1}^m \left(\frac{k_{22}^v}{s-s_v} + \frac{(k_{22}^v)^*}{s-s_v^*} \right) + z_{220}(s)(y_{220}(s)) \end{aligned} \right\}, \quad (17)$$

где $k_{11}^v, (k_{11}^v)^*, k_{21}^v, (k_{21}^v)^*, k_{22}^v, (k_{22}^v)^*$ – вычеты функций $z_{11}(s), z_{22}(s), z_{21}(s)$ ($y_{11}(s), y_{22}(s), y_{21}(s)$) относительно полюсов $s = -\sigma_v + j\omega_v, s = -\sigma_v - j\omega_v$; $z_{110}(s), z_{220}(s)$ ($y_{110}(s), y_{220}(s)$) – функции, полюса которых не вошли в число полюсов функций $z_{21}(s), (y_{21}(s))$.

Необходимые и достаточные условия физической реализуемости, которым должны удовлетворять элементы матрицы (17), определяются соотношениями (12)–(14), где $\alpha_{21}^v, \beta_{11}^v, \beta_{21}^v, \beta_{22}^v$ могут принимать как положительные, так и отрицательные значения.

Каноническая схема четырехполюсника, соответствующая элементам $\mathbf{z}(\mathbf{y})$ -матрицы (17), может быть получена последовательным (параллельным) соединением более простых четырехполюсников, описываемых матрицами (4).

В заключение следует отметить, что в общем случае, когда собственные функции $z_{11}(s), z_{22}(s), z_{21}(s)$ ($y_{11}(s), y_{22}(s), y_{21}(s)$) содержат несколько типовых составляющих, ограничения на физическую реализуемость (12)–(14) каждой из них могут быть сняты и заменены на более слабые, определяющие физическую реализуемость в целом всего синтезируемого четырехполюсника [8]:

$$\begin{aligned} \operatorname{Re} z_{11}(s) (\operatorname{Re} y_{11}(s)) &\geq 0; \\ \operatorname{Re} z_{22}(s) (\operatorname{Re} y_{22}(s)) &\geq 0; \end{aligned} \quad (18)$$

$$\operatorname{Re} z_{11}(s) \operatorname{Re} z_{22}(s) (\operatorname{Re} y_{11}(s) \operatorname{Re} y_{22}(s)) \geq (\operatorname{Re} z_{21}(s))^2 ((\operatorname{Re} y_{21}(s))^2).$$

Естественно, что реализация согласующего четырехполюсника должна быть в этом случае произведена общими методами [7].

Заключение

Определены необходимые и достаточные условия физической реализуемости матриц типовой составляющей подкласса четырехполюсников общего вида в сосредоточенном элементном базисе, когда полюсы собственных функций четырехполюсников могут находиться в левой полуплоскости комплексных частот, исключая мнимую и вещественную оси.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ланне А.А. Оптимальный синтез линейных цепей. – М.: Связь, 1969. – 272 с.
2. Шварц Н.З. Линейные транзисторные усилители СВЧ. – М.: Советское радио, 1980. – 368 с.
3. Ортюзи Ж. Теория электронных цепей: пер с фр. Т. 2 / под ред. Л.Р. Явича. – М.: Мир, 1971. – 548 с.
4. Богачев В.М. Обобщенная предельная задача Фано–Юлы // Радиотехника. – 1985. – № 6. – С. 47–51.
5. Девятков Г.Н. Автоматизированный синтез широкополосных согласующих устройств, связывающих произвольные иммитансы источника сигнала и нагрузки // Научный вестник НГТУ. – 2004. – № 1 (16). – С. 155–165.
6. Девятков Г.Н. Структура собственных параметров идеального согласующего четырехполюсника общего вида // Известия Международной академии наук высшей школы. – 2006. – № 1 (35). – С. 83–92.
7. Гиллемин Е.А. Синтез пассивных цепей. – М.: Связь, 1970. – 720 с.
8. Реза Ф., Сили С. Современный анализ электрических цепей: пер. с англ. – М.; Л.: Энергия, 1964. – 480 с.

**CONDITIONS FOR THE PHYSICAL REALIZABILITY OF A TYPICAL
COMPONENT $z(y)$ -MATRIX OF A MATCHING QUADRUPOLE
OF A GENERAL FORM IN A CONCENTRATED ELEMENTAL BASIS**

Devyatkov G.N.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

When solving problems of broadband matching, very often there is a need for a certain form of the amplitude-frequency characteristic. In connection with this, the problem comes up of synthesizing broadband matching devices that simultaneously have correcting properties, i.e. having a given frequency dependence of the power conversion coefficient in the operating frequency band. The use of broadband reactive matching - correcting circuits in most practical cases is difficult because of the reflected power. This leads to the problem of the synthesis of broadband matching-correcting circuits with arbitrary immittances of the signal source and load in an elemental basis of a general form, containing along with reactive and active elements, which has not been adequately solved. Therefore, it becomes necessary to find the conditions for the physical realizability of a typical component of the immittance matrix of a two-port network of general form containing poles in the left half-plane of complex frequencies. In this paper the necessary and sufficient conditions are defined for the physical realizability of the immittance matrix of a typical component of a subclass of two-terminal networks of general form in a lumped elemental electric basis, when the poles of the Eigen functions in the Foster representation can be in the left half-plane of complex frequencies, excluding the imaginary and real axes. This allows to synthesis of broadband dissipative matching, matching-correcting circuits and matched attenuators in an elemental basis of a general form with arbitrary immittances of the signal source and load from a single point of view.

Keywords: broadband matching, correction, immittance matrices, Eigen parameters, conditions of physical feasibility.

DOI: 10.17212/1727-2769-2020-3-13-20

REFERENCES

1. Lanne A.A. *Optimal'nyi sintez lineinykh tsepei* [Optimal synthesis of linear circuits]. Moscow, Svyaz' Publ., 1969. 272 p.
2. Shvarts N.Z. *Lineinye tranzistornye usiliteli SVCh* [Linear transistor microwave amplifiers]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1980. 368 p.
3. Ortusi J. *Teoriya elektronnykh tsepei*. T. 2 [Theory of electronic circuits. Vol. 2]. Ed. by L.R. Yavich. Moscow, Mir Publ., 1971. 548 p. (In Russian).

4. Bogachev V.M. Obobshchennaya predel'naya zadacha Fano-Yuly [Generalized Fano-Yula limit problem]. *Radiotekhnika = Radioengineering*, 1985, no. 6, pp. 47–51.
5. Devyatkov G.N. Avtomatizirovannyi sintez shirokopolosnykh soglasuyushchikh ustroystv, svyazyvayushchikh proizvol'nye immitansy istochnika signala i nagruzki [Automated synthesis of broad-band matching devices connecting arbitrary impedance of signals source and load]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2004, no. 1 (16), pp. 155–165.
6. Devyatkov G.N. Struktura sobstvennykh parametrov ideal'nogo soglasuyushche-korrektiruyushchego chetyrekhpolysnika obshchego vida [The structure of the Eigen parameters of an ideal matching-correcting four-terminal network of general form]. *Izvestiya mezhdunarodnoy akademii nauk vysshej shkoly = Proceedings of the International higher education academy of sciences*, 2006, no. 1 (35), pp. 83–92.
7. Guillemin E.A. *Synthesis of passive networks*. New York, Wiley, 1957 (Russ. ed.: Gillemmin E.A. *Sintez passivnykh tsepei*. Moscow, Svyaz' Publ., 1970. 720 p.).
8. Reza F., Seely S. *Modern network analysis*. New York, McGraw-Hill, 1959 (Russ. ed.: Reza F., Sili S. *Sovremenniy analiz elektricheskikh tsepei*. Moscow, Leningrad, Energiya Publ., 1964. 480 p.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Девятков Геннадий Никифорович – родился в 1945 году, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры конструирования и технологии радиоэлектронных средств Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: автоматизированный синтез активных и пассивных устройств СВЧ. Опубликовано 190 научных работ, в том числе 2 монографии. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: devyatkovgn@mail.ru).

Devyatkov Gennadii Nikiforovich (b. 1945) – Doctor of Science (Eng.), Associate Professor, Professor at the Department of Design and Technology of Electronic Devices in the Novosibirsk State Technical University. Research interests: automated synthesis and design of active and passive microwave devices. He is the author of over 150 scientific papers and 2 monographs. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: devyatkovgn@mail.ru).

Статья поступила 19 июля 2020 г.
Received July 19, 2020

To Reference:

Devyatkov G.N. Usloviya fizicheskoi realizuemosti tipovoi sostavlyayushchei $\mathbf{z}(\mathbf{y})$ -matritsy soglasuyushchego chetyrekhpolysnika obshchego vida v sosredotochennom elementnom baze [Conditions for the physical realizability of a typical component $\mathbf{z}(\mathbf{y})$ -matrix of a matching quadrupole of a general form in a concentrated elemental basis]. *Doklady Akademii nauk vysshej shkoly Rossijskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2020, no. 3 (48), pp. 13–20. DOI: 10.17212/1727-2769-2020-3-13-20.

УДК 536.2.004.414.23:532.5.004.414.23

ВЛИЯНИЕ УГЛА АТАКИ НА ТЕПЛОБМЕННЫЕ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ШАХМАТНОГО ПУЧКА ТРУБ КАПЛЕВИДНОЙ ФОРМЫ В ПОПЕРЕЧНОМ ОБТЕКАНИИ

Равад Дееб^{1,2}¹Университет Дамаска²ФГБОУ ВО Национальный исследовательский университет «МЭИ»

В качестве элементов теплообменников в энергоустановках, работающих по органическому циклу Ренкина ОЦР, могут применяться трубные пучки, при этом наружная поверхность трубок омывается горячим (газовым) теплоносителем, а внутри труб протекает рабочее вещество ОЦР. В данной работе проводится численное исследование гидродинамики и теплообмена шахматного пучка труб каплевидной формы при изменяющемся угле атаки набегающего потока в сравнении с трубами круглого сечения того же эквивалентного диаметра. Исследование выполнено для числа Рейнольдса $Re = 1,8 \times 10^3 \sim 9,4 \times 10^3$, продольный и поперечный шаг труб в пучке одинаков и равен 37 мм. Исследованы четыре случая расположения труб с различными углами атаки: 0, 45, 135 и 180 градусов. В статье представлен анализ литературы. Разработана математическая и численная модель для расчета теплообмена и гидродинамики пучка каплевидных труб с помощью программного пакета ANSYS с учетом напряженно-деформированного состояния труб. Представлены корреляции, позволяющие определить средние числа Нуссельта и коэффициента трения для рассматриваемых пучков в зависимости от числа Рейнольдса и угла атаки. Результаты настоящего исследования показывают, что теплоаэродинамическая эффективность пучка каплевидных труб при нулевом угле атаки примерно в 1,6...7 раза больше, чем пучка труб круглого сечения.

Ключевые слова: каплевидные трубы, угол атаки, деформация, число Нуссельта, коэффициент трения, численное моделирование, CFD.

DOI: 10.17212/1727-2769-2020-3-21-36

Введение

Круглые трубы широко используются в теплообменном оборудовании из-за простоты производства и способности выдерживать высокое давление. Однако при внешнем обтекании круглой трубы в кормовой части трубы образуется вихревая зона с перестройкой структуры пограничного слоя, что может приводить к существенным потерям давления и значительным вибрациям. Расположение труб относительно направления набегающего потока можно классифицировать как коридорное и шахматное. Шахматный пучок труб прост в изготовлении, имеет высокий теплообмен и перепад давления в допустимом диапазоне. Существует большое количество исследований, в которых учитывается влияние геометрии и расположения труб в пучке на эффективность теплообменников. Трубы в шахматном расположении обеспечивают лучшие тепловые характеристики по сравнению с коридорными расположением труб, а также немного больший перепад

давления [1, 2]. Авторы работы [3] исследовали характеристики потока и тепло-массообмена в шахматном и коридорном расположении. Числа Рейнольдса были в диапазоне от 50 до 1000. Было найдено, что с увеличением числа Рейнольдса место начала выделения вихрей перемещается вверх по течению, а развитие потока вверх по течению намного быстрее для труб с шахматным расположением по сравнению с коридорным расположением.

В последнее десятилетие несколько исследователей рассматривали трубы некруглого сечения для разделительного теплообменника с поперечным потоком. Статья [4] посвящена проблеме теплообмена и гидродинамики коридорного пучка кулачковых труб. Число Рейнольдса варьировалось в диапазоне $Re = 27 \times 10^3 \dots 42\,500$ с относительным продольным шагом $S_{\text{про}}/D_{\text{эк}} = 1,5 \dots 2$. Эксперимент показывает, что коэффициент сопротивления формы максимален для первого ряда и минимален для второго для всего диапазона числа Рейнольдса, но теплоотдача от первого ряда минимальна. Тем не менее при увеличении коэффициента продольного шага теплопередача увеличивается. В [5] экспериментально исследовали влияние углов атаки на теплоотдачу и характеристики перепада давления при поперечном обтекании плоских трубок, имеющих различные соотношения x/y . Было обнаружено, что наилучшие теплогидравлические характеристики достигаются при нулевом угле атаки. Авторы статьи [6] численно провели сравнение условий теплообмена пучка труб шахматной компоновки в поперечном потоке для труб различной формы – цилиндрической, эллипсоидальной и каплевидной. Продольный и поперечный шаг труб в пучке составил от 1,125 до 2,0. Было показано, что коэффициент сопротивления и число Стентона ниже у эллипсоидальных и каплевидных труб, чем у цилиндрических. Однако коэффициент сопротивления и число Стентона уменьшаются с увеличением числа Рейнольдса. В работе [7] численно и экспериментально исследованы гидродинамические характеристики и теплообмен шахматного пучка труб каплевидной формы при изменяющемся угле атаки набегающего газового потока. Было найдено, что исследованный пучок с нулевым углом атаки увеличил значения Nu примерно на 24 и 76 % по сравнению с такими для круглых и эллиптических труб соответственно. Кроме того, было показано, что самые низкие значения коэффициента перепада давления и мощности прокачки были достигнуты при $\theta = 0^\circ$ для всех значений Re . В статьях [9, 10] предложили корреляции для расчета теплообмена и перепада давления шахматных и коридорных пучков круглых труб. Исследование выполнено для числа Рейнольдса от 1 до $2 \cdot 10^6$ и для широкого диапазона продольных и поперечных шагов. Авторы предложили коэффициент для оценки эффективности поверхностей теплообмена с целью улучшения конструкций теплообменников. Авторы статей [11–13] численно исследовали гидродинамику и теплообмен пучка каплевидных труб различной конфигурации. Их результаты показали, что гидродинамическое сопротивление пучков каплеобразных труб меньше, чем у круглых при углах атаки $\theta = 0^\circ, 180^\circ$. Была предложена корреляция для расчета теплообмена в зависимости от числа Рейнольдса и угла атаки с учетом напряженно-деформированного состояния труб. В работе [14] проведено численное исследование теплообмена и аэродинамического сопротивления одиночных труб каплевидного и круглого профиля поперечного сечения при поперечном обтекании воздухом. Теплоаэро-

динамическая эффективность каплевидной трубы с относительным удлинением профиля ($L/D = 4$) примерно в 11,5...20,2 раза больше, чем для одиночной круглой трубы ($L/D = 1$). Автор работы [15] численно исследовал влияния продольного шага на характеристики потока и теплообмен при поперечном обтекании шахматного пучка труб каплевидной формы при нулевом угле атаки. Результаты показывают, что пучок труб с продольным шагом 46,25 мм имеет более интенсивный теплообмен с меньшим гидродинамическим сопротивлением по сравнению с пучком с шагом 37 мм. Также было найдено, что теплоаэродинамическая эффективность пучка каплевидных труб примерно в 18,1...43,7 раза больше, чем пучка труб круглого сечения. В работе [16] экспериментально исследовано аэродинамическое сопротивление при поперечном обтекании одиночных каплевидных труб. Полученные результаты показали, что каплевидные трубы имеют более низкое аэродинамическое сопротивление по сравнению с круглыми трубами.

Численное моделирование открывает огромные возможности для решения задач сложных турбулентных течений. Несколько исследователей определили лучший модельный и численный метод с точки зрения точности и вычислительных затрат. Авторы работы [17] численно смоделировали двухмерное течение вокруг двух круглых цилиндров в коридорном расположении, чтобы исследовать характеристики потока. Результаты показывают, что расширенные $k-\epsilon$ и RNG $k-\epsilon$ модели предлагают более точные результаты, чем стандартная $k-\epsilon$ модель. В научной работе [18] исследованы характеристики потока и теплоотдачи шахматного пучка труб различной формы с помощью программы ANSYS. Было отмечено, что CFD является лучшим инструментом для прогнозирования результатов эксперимента перед их выполнением. Модель RNG $k-\epsilon$ турбулентности показывает существенное преимущество для искривленных, вихревых и вращающихся потоков. Модель RNG $k-\epsilon$ показала сходство между численными и экспериментальными результатами [19].

Из обзора литературы следует, что существует всего несколько исследований, в которых рассматривались каплевидные трубы. Поэтому предметом настоящего исследования является оценка влияния угла атаки на теплообменные и гидродинамические характеристики шахматного пучка труб каплевидной формы при поперечном обтекании с учетом напряженно-деформированного состояния. Исследования проводятся на основе разработанной математической и численной модели в пакете ANSYS. Результаты сравниваются с круглыми трубами того же эквивалентного диаметра.

1. Описание объекта исследования

Объектом исследования является пучок из 22 каплевидных труб шахматного расположения. Каплевидные трубы расположены в канале квадратного поперечного сечения со стороной 305 мм (рис. 1) и имеют следующие размеры: радиус широкой части 5,8 мм, радиус малой части 2,9 мм, эквивалентный диаметр $D_{эк} = 22,5$ мм, продольный (S_L) и поперечный (S_T) шаг труб в пучке одинаков и равен 37 мм (рис. 2, а). Изменение угла атаки θ достигается одновременным поворотом всех труб пучка на 0...45...135...180 градусов по часовой стрелке (рис. 2, б).

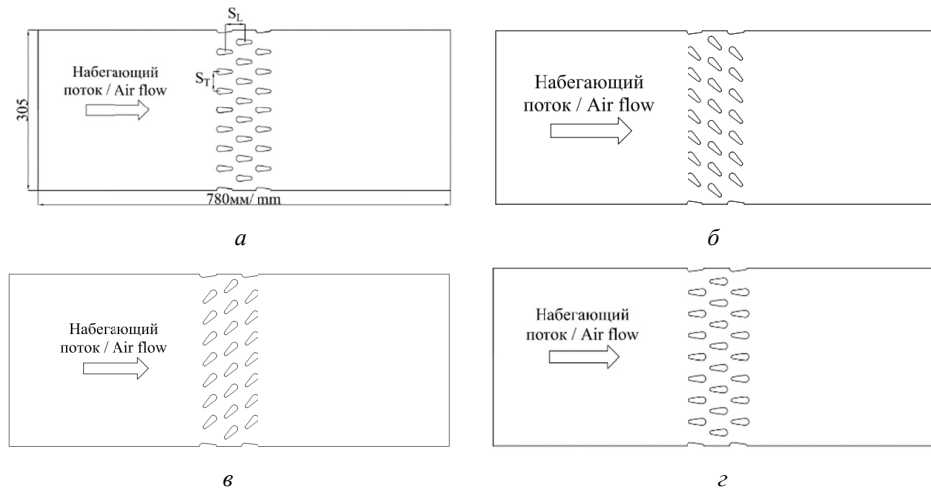


Рис. 1 – Двумерный канал с пучком каплевидных труб шахматной компоновки:
 $a - \theta = 0^\circ$; $б - \theta = 45^\circ$; $в - \theta = 135^\circ$; $г - \theta = 180^\circ$

Fig. 1 – Two-dimensional channel with a staggered drop-shaped tubes bundle:
 $a - \theta = 0^\circ$; $b - \theta = 45^\circ$; $c - \theta = 135^\circ$; $d - \theta = 180^\circ$

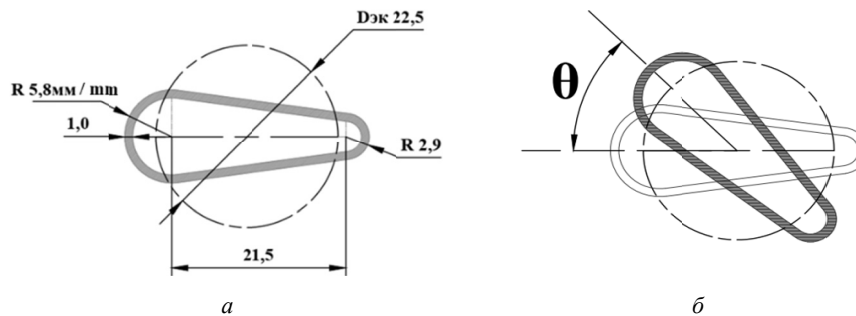


Рис. 2 – Объект исследования:

a – поперечное сечение каплевидной трубы; $б$ – изменение угла атаки

Fig. 2 – Object of study:

a – drop-shaped tube cross-section dimensions; b – adjusting the flow attack angle

2. Процесс численного моделирования

Процесс численного моделирования выполнялся в два этапа: первый этап – моделирование напряженно-деформированного состояния, а второй этап – численное исследование теплообмена и гидродинамики при обтекании рассматриваемых пучков труб.

Моделирование напряженно-деформированного состояния проведено с помощью ANSYS Static Structural, определены деформации, вызванные разностью давлений внутри (14 бар) и снаружи медных труб (1 бар).

На рис. 3, 4 представлены сетка и поперечное сечение трубы после деформации соответственно.

Из рис. 4 видно, что деформация происходит в боковых участках трубы. Максимальное значение деформации наблюдается в центре этих прямых участков (значительного изменения геометрии трубы не происходит при заданных значе-

ниях давления внутри и снаружи). Подробно напряженно-деформированное состояние при разных углах атаки обсуждается в ранее опубликованной работе [11].

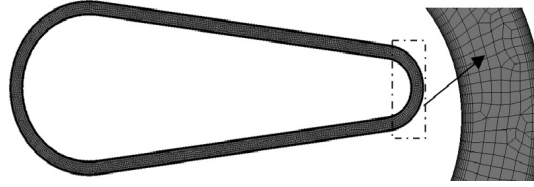


Рис. 3 – Сетка исследуемого объекта в ANSYS: Static Structural, $\theta = 0^\circ$

Fig. 3 – Mesh of the studied object in ANSYS: Static Structural, $\theta = 0^\circ$

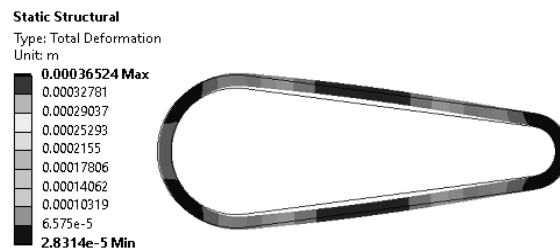


Рис. 4 – Состояние под нагрузкой при $\theta = 0^\circ$

Fig. 4 – Stress state at $\theta = 0^\circ$

После деформации геометрия экспортируется в ANSYS Fluent, задача вынужденной конвекции решалась в двумерной стационарной постановке с использованием приближения вязкой несжимаемой жидкости с постоянными теплофизическими свойствами, с учетом возможной турбулизации потока и без учета теплообмена излучением. Система дифференциальных уравнений сохранения включает в себя уравнение неразрывности, две проекции уравнения движения, уравнение энергии:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho U_i) = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_i U_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}; \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} [U_i (\rho E + p)] = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda_\Sigma \frac{\partial T}{\partial x_i} \right), \quad (3)$$

где ρ – плотность воздуха; U – скорость воздуха; P – давление воздуха; τ_{ij} – тензор вязких напряжений; λ_Σ – «эффективный» коэффициент теплопроводности среды; T – температура жидкости.

На данном этапе используется модель турбулентности $RNG\ k-\varepsilon$ с функцией «Enhanced wall Treatment» [19, 20]. Расчет числа Рейнольдса выполнялся по средней скорости потока в узком сечении рабочего участка $Re_D = \rho U_{cp} D_{эк} / \mu$

(табл. 1), где μ – динамическая вязкость; $U_{\text{ср}}$ – средняя скорость потока в узком сечении пучка.

Расчетная сетка генерируется с использованием ICEM CFD. Для наиболее точной симуляции сетка (Quad/TRI элементы) строилась со сгущением в областях наибольшего градиента скорости (рис. 5) с соблюдением необходимого требования к выбранной модели турбулентности по значению $1 < y^+ < 5$. Качество сетки 0,93 сохраняется на протяжении всего моделирования. Алгоритм решения связи уравнения движения и неразрывности (Pressure – Velocity Coupling) при решении выбирался SIMPLE. Для получения точных решений использовалась дискретизация второго порядка точности (Second Order Upwind). Прерывание счета при достижении уравнения погрешностей 10^{-7} .

Таблица 1 / Table 1

Числа Рейнольдса, рассчитанные по средней скорости в узком сечении для различных углов атаки
Reynolds number calculated by the minimum free cross-section for different angles of attack

θ	Re_D
0°	$3,58 \times 10^3 \sim 19,12 \times 10^3$
45°	$6,79 \times 10^3 \sim 37,43 \times 10^3$
135°	$6,88 \times 10^3 \sim 39,04 \times 10^3$
140°	$3,34 \times 10^3 \sim 18,45 \times 10^3$

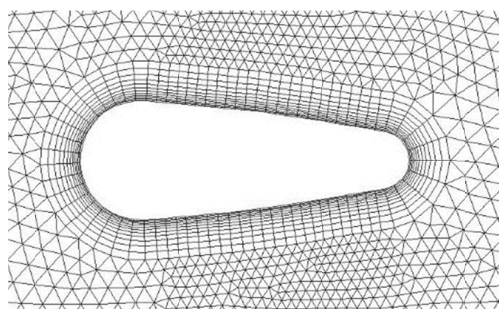


Рис. 5 – Сетка исследуемого объекта в ANSYS Fluent, $\theta = 0^\circ$

Fig. 5 – Mesh of the studied object in ANSYS Fluent, $\theta = 0^\circ$

Чувствительность результатов моделирования существенно зависит от количества и качества узлов расчетной сетки. Плотность сетки увеличивалась до тех пор, пока не было получено сеточно-независимое решение. Поэтому в данной работе с целью получения оптимального решения поставленной задачи количество узлов варьировалось от 61,220 до 324,742 (рис. 3).

На рис. 6 видно, что сетка из 145,850 узлов обеспечивает сеточно-независимое решение для вычислительного среднего числа Нуссельта. Следовательно, сетка из 145,850 узлов рассматривается здесь и далее для оптимизации времени и точности решения.

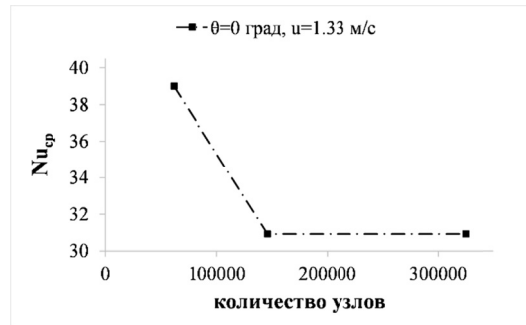


Рис. 6 – Анализ чувствительности сетки

Fig. 6 – Mesh-sensitivity analysis

В качестве внешнего теплоносителя, обтекающего пучок, рассматривался поток воздуха со скоростью на входе в канал $u = 1,33 \dots 7$ м/с, что соответствует числам Рейнольдса $Re = 1,8 \times 10^3 \dots 9,4 \times 10^3$, при температуре $56,5$ °С и атмосферном давлении, средняя температура стенки равна $20,8$ °С.

3. Верификация разработанной численной модели

Для верификации разработанной численной модели теплообмен и гидродинамика круглой и каплевидной трубы моделируются путем сравнения с экспериментальными результатами, полученными в работах [9] и [16] ($D = 28$ мм) в том же диапазоне значений числа Рейнольдса. Получено хорошее совпадение результатов (рис. 7, а, б), что свидетельствует об адекватности модели и метода моделирования, представленных в данном исследовании.

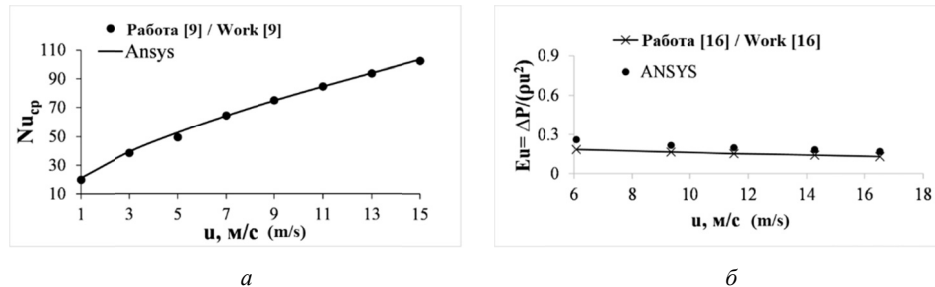


Рис. 7 – Верификация численной модели:

$$a - Nu_{cp} = f(u); \quad б - Eu = f(u)$$

Fig. 7 – Numerical model verification:

$$a - Nu_{cp} = f(u); \quad b - Eu = f(u)$$

4. Обсуждение полученных результатов

4.1. Линии тока

Линии тока помогают отследить путь частиц жидкости по периметру трубы и также указывают на плотность и расположение вихрей, образованных в пучке. Для расположения $\theta = 0^\circ$ (рис. 8, а) при скорости набегающего потока $u = 1,33$ м/с есть три отрывные зоны: две на боковых поверхностях и одна в кормовой части труб. Отрыв пограничного слоя от поверхности обусловлен силами трения, изме-

нением давления и скорости, также отрыв потока может происходить в результате увеличения сопротивления давления, вызванного перепадом давления протекающего воздуха между передней и задней поверхностями трубы. С увеличением скорости потока до $u = 7$ м/с вихревые зоны на боковых поверхностях трубы исчезают, а существуют только на ее задней поверхности (рис. 8, б). Это связано с тем, что при высоких значениях скорости поток становится более мощным, что позволяет пограничному слою сдвигаться дальше вниз по потоку.

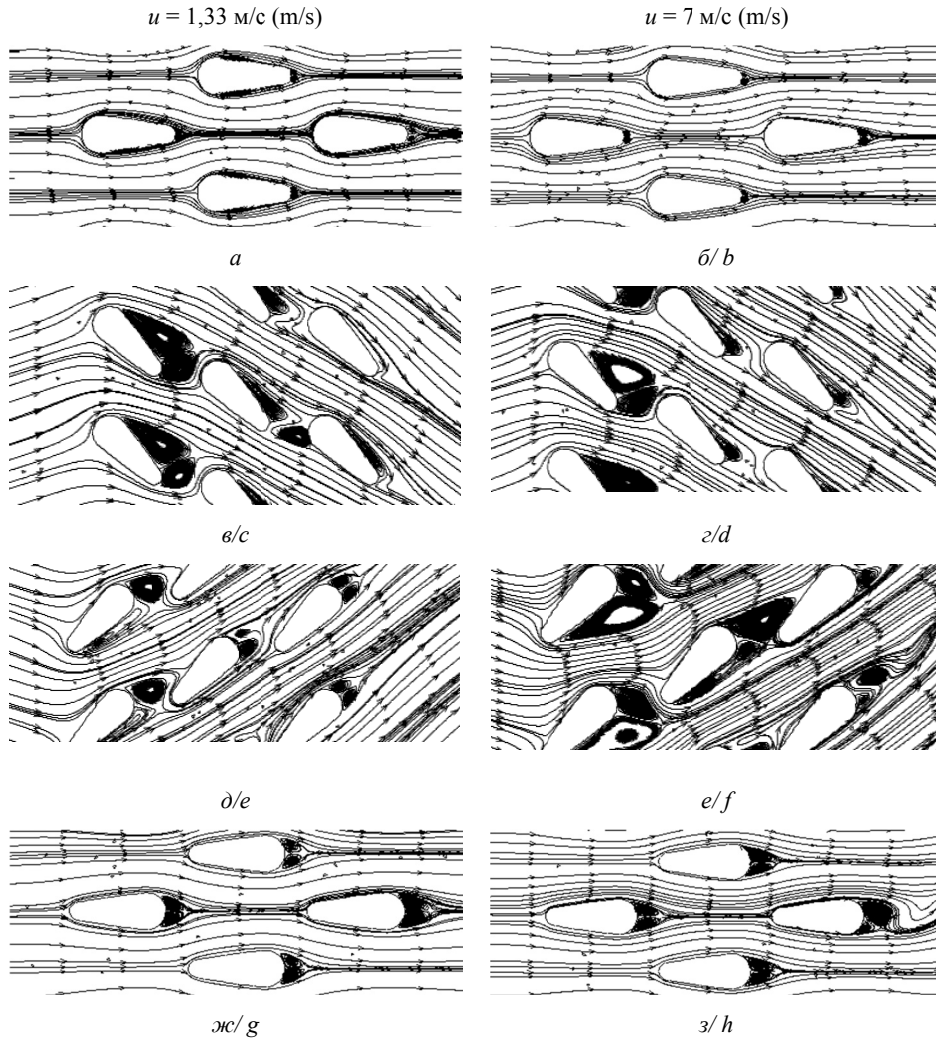


Рис. 8 – Линии тока:
 $a, б - \theta = 0^\circ$; $в, з - \theta = 45^\circ$; $д, е - \theta = 135^\circ$; $ж, з - \theta = 180^\circ$

Fig. 8 – Flow path lines:
 $a, b - \theta = 0^\circ$; $c, d - \theta = 45^\circ$; $e, f - \theta = 135^\circ$; $g, h - \theta = 180^\circ$

Для случая $\theta = 45^\circ$ (рис. 8, в), при низкой скорости воздуха, вихревые зоны на боковых поверхностях труб первого ряда увеличились из-за их наибольшего лобового сопротивления. Первый ряд труб направляет поток, проходящий через последующие ряды, поэтому отрывные зоны во втором и третьем рядах уменьши-

лись. При высокой скорости воздуха, как показано на рис. 8, *з*, интенсивность вихревых зон уменьшилась после первого ряда и на боковых поверхностях труб второго и третьего рядов по сравнению с рис. 8, *в*.

Для расположения $\theta = 135^\circ$ (рис. 8, *д*), при $u = 1,33$ м/с, вихревые зоны возникают за большим диаметром труб. Однако при $u = 7$ м/с (рис. 8, *е*) интенсивность вихревых зон увеличилась и дополнительные вихри появились на нижних боковых поверхностях труб из-за воздействия неблагоприятных и благоприятных градиентов давления потока.

Для случая $\theta = 180^\circ$ (рис. 8, *ж*, *з*), на прямых боковых участках трубы отсутствуют вихревые зоны. По мере увеличения скорости набегающего потока на входе в канал увеличивается перемешивание жидкости в кормовой части труб.

4.2. Влияние угла атаки на теплообмен в пучке труб

Температура воздуха в пучке труб уменьшается за счет нагрева поверхности трубы. Интенсивность падения температуры воздуха увеличивается по мере того, как воздух проходит мимо рядов труб. Рис. 9 показывает число Нуссельта для соответствующих чисел Рейнольдса, рассчитанное по средней скорости потока в узком сечении пучка из решения ANSYS. Для всех исследованных случаев среднее число Нуссельта Nu_{cp} растет с увеличением скорости воздуха. Это связано с увеличением интенсивности турбулизации воздуха за рядами труб.

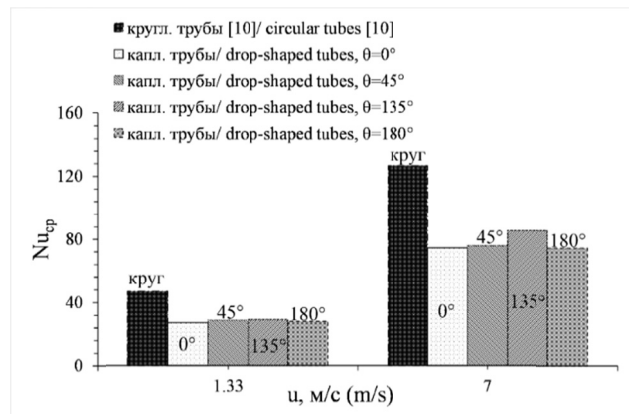


Рис. 9 – Числа Нуссельта из расчета чисел Re по u_{cp} с помощью ANSYS

Fig. 9 – Nusselt numbers for Re calculated by u_{cp} using ANSYS

Из рис. 9 следует, что значения коэффициента теплоотдачи с использованием круглых труб выше, чем у каплевидных труб. Это может быть связано с тем, что площадь турбулентности за круглыми трубами больше, чем у каплевидных труб, что способствует улучшению теплообмена. Для каплевидных труб, при $u = 1,33$ м/с, разница между значениями Nu_{cp} очень мала. При увеличении скорости воздуха до 7 м/с среднее число Нуссельта увеличивается в 2,71; 2,77; 2,67; 2,96; 2,67 раза для круглых и каплевидных труб при $\theta = 0^\circ$; 45° ; 135° ; 180° соответственно. Пучок каплевидных труб с $\theta = 135^\circ$ имеет максимальное значение Nu_{cp} , равное, 27,81 и 74,36 для $u = 1,33$ и 7 м/с соответственно.

Среднее число Нуссельта пучка определялось по результатам вычислительного эксперимента как

$$\text{Nu}_{\text{cp}} = \frac{\alpha_{\text{cp}} D}{\lambda}. \quad (4)$$

Средний по поверхности пучка коэффициент теплоотдачи вычисляется по формуле

$$\alpha_{\text{cp}} = \frac{1}{F} \int_0^F \alpha dF. \quad (5)$$

Результаты вычислительного эксперимента обработаны в виде следующей корреляции:

$$\text{Nu}_{\text{cp}} = a \text{Re}_D^b \text{Pr}^{1/3} \left(1 + \frac{\theta^\circ}{90^\circ} \right)^c, \quad (6)$$

где теплофизические свойства [21] рассчитаны для средней температуры входящего потока. Коэффициенты a , b , c уравнения подобия (6) для диапазона чисел $\text{Re} = 1,8 \times 10^3 \dots 9,4 \times 10^3$, $\text{Pr} \cong 0,7$ представлены в табл. 2.

Таблица 2 / Table 2

Коэффициенты уравнения подобия (6)
The coefficients of the equation (6)

θ	a	b	c
$0^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$	0.318	0.574	-0.797
$\theta = 135^\circ$	0.318	0.574	-0.336
$\theta = 180^\circ$	0.318	0.574	-0.027

4.3. Влияние угла атаки на гидродинамические характеристики

С помощью программы ANSYS Fluent был найден перепад давления воздушного потока (ΔP), вызванный аэродинамическим сопротивлением исследуемых пучков труб. Результаты показаны на рис. 10 в виде зависимости коэффициента трения от скорости набегающего потока. Коэффициент трения f определяется как

$$f = \frac{\Delta P}{1/2 \rho U_{\text{cp}}^2 N_L}, \quad (7)$$

где N_L – число поперечных рядов.

Коэффициент трения круглых и каплевидных труб при $\theta = 0^\circ; 45^\circ; 180^\circ$ уменьшается с увеличением скорости набегающего потока, в то время как противоположное происходит при $\theta = 135^\circ$ (рис. 10). Самым низким коэффициентом трения обладает пучок каплевидных труб при $\theta = 0^\circ$. Для случая $\theta = 0^\circ$, когда поток проходит по поверхности трубы, давление снижается до наименьшего значения на боковой поверхности. На прямых боковых участках трубы, за областью отрыва, происходят падение скорости и возрастание давления (рис. 8, а). По мере увеличения скорости набегающего потока отрывная зона от боковых участков трубы сдвигается вниз по потоку, что приводит к падению сопротивления (рис. 8, б). Для случая $\theta = 180^\circ$, после отрыва в кормовой части, поток характеризуется резким изменением давления, увеличением скорости потока и имеет широкую зону рециркуляции за каждой трубой (рис. 8, ж, з).

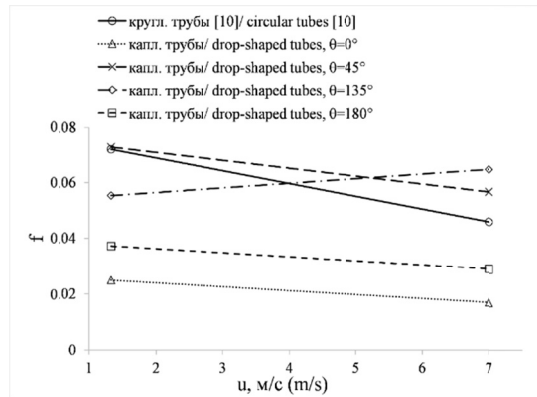


Рис. 10 – Коэффициент трения в зависимости от скорости набегающего потока

Fig. 10 – Friction coefficient Vs air velocity

Максимальные значения f достигаются для $\theta = 45^\circ$ при $u = 1,33$ м/с и для $\theta = 135^\circ$ при $u = 7$ м/с. Коэффициент трения пучка каплевидных труб при $\theta = 180^\circ$ и для скоростей воздуха 1,33...7 м/с на 49,45...71,14 % больше по сравнению с пучком каплевидных труб при $\theta = 0^\circ$, это обусловлено наличием в ней удлиненной части, приводящей к замедлению потока при его движении вдоль профиля трубы и, соответственно, к увеличению давления.

Результаты показывают, что коэффициент трения пучка каплевидных труб при $\theta = 0^\circ$ примерно в 2,8 раза меньше, чем пучка труб круглого сечения.

Для расчета коэффициента трения пучка труб в форме капли данные вычислительного эксперимента обрабатываются в виде следующих зависимостей:

$$f = a + b \operatorname{Re}_D + c \left(1 + \frac{\theta^\circ}{90^\circ} \right). \quad (8)$$

Уравнение (8) применимо для диапазона чисел $\operatorname{Re} = 1,8 \times 10^3 \dots 9,4 \times 10^3$. Коэффициенты зависимости (8) представлены в табл. 3.

Таблица 3 / Table 3

Коэффициенты уравнения (8)
The coefficients of the equation (8)

θ°	a	b	c
$0^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$	-0,07185	$-5,2099 \times 10^{-7}$	0,09869
$\theta = 135^\circ$	0,1827	$1,4011 \times 10^{-7}$	-0,05037
$\theta = 180^\circ$	0,2224	$-3,9711 \times 10^{-7}$	-0,06187

Выше обсуждались характеристики теплоотдачи и коэффициента сопротивления трения для пучка круглых и каплевидных труб. Однако необходимо оценить совокупный эффект их изменения вместе. Теплоаэродинамическая эффективность каплевидных труб определяется путем сравнения с круглыми трубами того же эквивалентного диаметра по формуле [22]:

$$\eta = \frac{\operatorname{Nu}_{\text{ср.капл}} / \operatorname{Nu}_{\text{ср.кругл}}}{f_{\text{капл}} / f_{\text{кругл}}}. \quad (9)$$

На рис. 11 представлена теплоаэродинамическая эффективность круглых и каплевидных труб для всего исследуемого диапазона скорости воздуха.

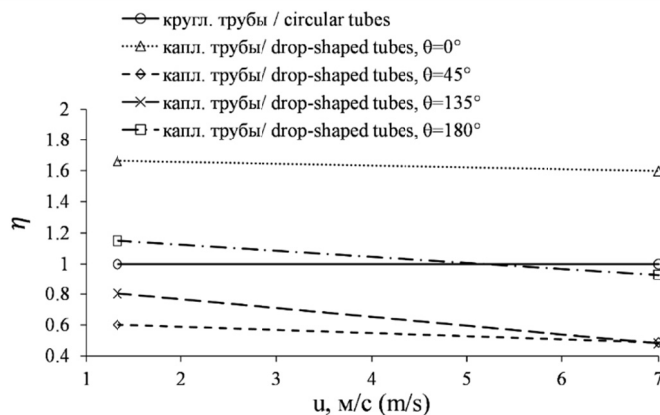


Рис. 11 – Теплоаэродинамическая эффективность круглых и каплевидных труб с различными углами атаки потока

Fig. 11 – Thermal-hydraulic performance for bundles of circular and drop-shaped tubes with different flow angles of attack

Результаты показывают, что η уменьшается с увеличением скорости воздуха. Как видно на рис.11, для каплевидных труб, пучок с нулевым углом атаки имеет наибольшие значения η , далее η уменьшается при углах атаки 180, 35 и 45° соответственно. Теплоаэродинамическая эффективность исследуемого пучка каплевидных труб при $\theta = 0^\circ$ и для диапазона скоростей воздуха 1,33...7 м/с примерно в 1,6...1,7 раза больше, чем пучка круглых труб.

Заключение

Проведено численное исследование гидродинамики и теплообмена шахматного пучка труб каплевидной формы при изменяющемся угле атаки набегающего потока. Выполнено сравнение полученных результатов с результатами для труб круглой формы.

Разработана математическая и численная модель для расчета теплообмена и гидродинамики трехрядного шахматного пучка каплевидных труб с помощью программы ANSYS с учетом напряженно-деформированного состояния труб. Представлены корреляции, позволяющие определить средние значения числа Нуссельта и коэффициента трения для рассматриваемых пучков.

Представленное в настоящей работе сравнение результатов моделирования теплоотдачи, при обтекании пучка круглых и каплевидных труб эквивалентного диаметра, не выявило преимуществ последних. Однако коэффициент трения пучка круглых труб больше в 2,9...3,3 раза, чем пучка каплевидных труб при $\theta = 0^\circ$.

Значение η больше для пучка каплевидных труб при нулевом угле атаки. Также выявлено, что теплоаэродинамическая эффективность уменьшается при изменении углов атаки в следующем порядке: 180, 35 и 45° соответственно.

Полученные результаты могут служить основой для дальнейших исследований гидродинамических характеристик и теплообмена пучков труб каплевидной формы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Heat transfer enhancement mechanisms in inline and staggered parallel-plate fin heat exchangers / L.W. Zhang, S. Balachandar, D.K. Tafti, F.M. Najjar // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 1997. – Vol. 40, N 1. – P. 2307–2325. – DOI: 10.1016/S0017-9310(96)00303-1.
2. **Chen Y., Fiebig M., Mitra N.K.** Heat transfer enhancement of finned oval tubes with staggered punched longitudinal vortex generators // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2000. – Vol. 43, N 1. – P. 417–435. – DOI: 10.1016/S0017-9310(99)00157-X.
3. **Nishimura T., Hisayoshi I., Hisashi M.** The influence of tube layout on flow and mass transfer characteristics in tube banks in the transitional flow regime // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 1993. – Vol. 36, N 3. – P. 553–563. – DOI: 10.1016/0017-9310(93)80031-O.
4. **Lavasani A.M., Bayat H., Maarefdoost T.** Experimental study of convective heat transfer from in-line cam shaped tube bank in crossflow // *Applied Thermal Engineering*. – 2016. – Vol. 65. – P. 85–93. – DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2013.12.078.
5. **Toothaisong S., Kasayapanand N.** Effect of attack angles on air side thermal and pressure drop of the cross-flow heat exchangers with staggered tube arrangement // *Energy Procedia*. – 2013. – Vol. 34. – P. 417–429. – DOI: 10.1016/j.egypro.2013.06.770.
6. **Horvat A., Leskovar M., Mavko B.** Comparison of heat transfer conditions in tube bundle cross-flow for different tube shapes // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2006. – Vol. 49, N 1. – P. 1027–1038. – DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.09.030.
7. Heat transfer characteristics of staggered wing-shaped tubes bundle at different angles of attack / A.E. Sayed, Z.I. Emad, M.M. Osama, A.A. Mohamed // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2014. – Vol. 50, N 8. – P. 1091–1102. – DOI: 10.1007/s00231-014-1323-3.
8. Effect of attack and cone angels on air flow characteristics for staggered wing shaped tubes bundle / A.E. Sayed, Z.I. Emad, M.M. Osama, A.A. Mohamed // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2014. – Vol. 51, N 7. – P. 1001–1016. – DOI: 10.1007/s00231-014-1473-3.
9. **Zhukauskas A., Ulinskas R.V.** Efficiency parameters of heat transfer in tube banks // *Heat Transfer Engineering*. – 1985. – Vol. 6, N 1. – P. 19–25. – DOI: 10.1080/01457638508939614.
10. **Zhukauskas A.** Heat transfer from tubes in cross-flow // *Advances in Heat Transfer*. – 1972. – Vol. 8. – P. 93–160. – DOI: 10.1016/S0065-2717(08)70038-8.
11. **Deeb R., Sidenkov D.V.** Numerical simulation of the heat transfer of staggered drop-shaped tubes bundle // *IOP Conference Series: Journal of Physics*. – 2019. – Vol. 1359. – P. 012135. – DOI: 10.1088/1742-6596/1359/1/012135.
12. **Deeb R., Sidenkov D.V.** Investigation of flow characteristics for drop-shaped tubes bundle using Ansys package // *2020 V International Conference on Information Technologies in Engineering Education (Inforino)*. – Moscow, 2020. – P. 1–5. – DOI: 10.1109/Inforino48376.2020.9111775.
13. **Deeb R., Sidenkov D.V.** Calculation of radiation heat transfer in staggered drop-shaped tubes bundle // *IOP Conference Series: Journal of Physics*. – 2019. – Vol. 1565. – P. 012043. – DOI: 10.1088/1742-6596/1565/1/012043.
14. **Деб Р., Сиденков Д.В.** Численное исследование теплообмена и аэродинамики одиночных труб каплевидной формы // *Вестник Международной академии холода*. – 2020. – № 3. – С. 91–99.
15. **Deeb R.** Effect of longitudinal spacing on the flow and heat transfer for staggered drop-shaped tubes bundle in cross-flow // *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*. – 2020. – Vol. 21, N 1. – DOI: 10.33257/PhChGD.21.1.878.
16. **Терех А.М., Руденко А.И., Жукова Ю.В.** Аэродинамическое сопротивление и визуализация течения вокруг одиночных труб каплеобразной формы // *Инженерно-физический журнал*. – 2013. – Т. 86, № 2. – С. 358–364.
17. **Jafari H.H., Dehkordi B.G.** Numerical prediction of fluid-elastic instability in normal triangular tube bundles with multiple flexible circular cylinders // *Journal of Fluids Engineering*. – 2013. – Vol. 135, N 3. – P. 031102. – DOI: 10.1115/1.4023298.

18. **Priyank D.P., Karnav N S., Kush V. M., Chetan O.Y.** CFD analysis of heat exchanger over a staggered tube bank for different angle arrangement of tube bundles // *International Journal of Engineering Research and Technology*. – 2013. – Vol. 2. – No. 1. – pp. 2278–0181.
19. Renormalization group modeling and turbulence simulations / S.A. Orszag, V. Yakhot, W.S. Flannery, F. Boysan // *Near-Wall Turbulent Flows*. – Tempe, AZ, 1993.
20. ANSYS Fluent Reference Guide 16.0. – 2015.
21. **Цветков Ф.Ф., Керимов Р.В., Величко В.И.** Задачник по тепломассообмену. – М.: МЭИ, 2008. – 196 с.
22. **Webb R.** Performance evaluation criteria for use of enhanced heat transfer surfaces in heat exchanger design // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 1981. – Vol. 24, N 4. – P. 715–726.

EFFECT OF ANGLE OF ATTACK ON HEAT TRANSFER AND HYDRODYNAMIC CHARACTERISTICS FOR STAGGERED DROP-SHAPED TUBES BUNDLE IN CROSS-FLOW

Deeb Rawad^{1,2}

¹*Damascus University*

²*National Research University (Moscow Power Engineering Institute)*

Tube bundles can be used as a separation heat exchanger in the organic Rankine cycle power plants (ORC), while the hot gas passes over the outer surface, and the working substance ORC flows inside the tubes. A numerical study has been conducted to clarify heat transfer and hydrodynamics of a cross-flow heat exchanger with staggered drop-shaped tubes at different flow angles of attack in comparison with circular tubes of the same equivalent diameter. The study was performed for the Reynolds number $Re = 1.8 \times 10^3 \sim 9.4 \times 10^3$, the longitudinal and transverse spacing of the tubes in the bundle are the same and are equal to 37 mm. Four cases of the tube's arrangement with different angles of attack were investigated: 0, 45, 135, and 180 angles. The article presents a literature review related to the subject of the study. A mathematical and numerical model has been developed to calculate the heat transfer coefficient of the studied staggered drop-shaped tubes bundle using the ANSYS package, taking into account the stress-strain state of the tubes. Correlations of the average Nusselt numbers and the friction coefficient for the considered bundles in terms of the Reynolds number and angle of attack were presented. The results reveal that the thermal-hydraulic performance of the drop-shaped tubes bundle with zero-angle of attack is about 1.6 ~ 1.7 times greater than the circular one.

Keywords: drop-shaped pipes, angle of attack, deformation, Nusselt number, friction coefficient, numerical simulation, CFD.

DOI: 10.17212/1727-2769-2020-3-21-36

REFERENCES

1. Zhang L.W., Balachandar S., Tafti D.K., Najjar F.M. Heat transfer enhancement mechanisms in inline and staggered parallel-plate fin heat exchangers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1997, vol. 40, no. 1, pp. 2307–2325. DOI: 10.1016/S0017-9310(96)00303-1.
2. Chen Y., Fiebig M., Mitra N.K. Heat transfer enhancement of finned oval tubes with staggered punched longitudinal vortex generators. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2000, vol. 43, no. 1, pp. 417–435. DOI: 10.1016/S0017-9310(99)00157-X.
3. Nishimura T., Hisayoshi I., Hisashi M. The influence of tube layout on flow and mass transfer characteristics in tube banks in the transitional flow regime. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1993, vol. 36, no. 3, pp. 553–563. DOI: 10.1016/0017-9310(93)80031-O.
4. Lavasani A.M., Bayat H., Maarefdoost T. Experimental study of convective heat transfer from in-line cam shaped tube bank in crossflow. *Applied thermal engineering*, 2016, vol. 65, pp. 85–93. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2013.12.078.

5. Toolthaisong S., Kasayapanand N. Effect of attack angles on air side thermal and pressure drop of the cross-flow heat exchangers with staggered tube arrangement. *Energy Procedia*, 2013, vol. 34, pp. 417–429. DOI: 10.1016/j.egypro.2013.06.770.
6. Horvat A., Leskovar M., Mavko B. Comparison of heat transfer conditions in tube bundle cross-flow for different tube shapes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2006, vol. 49, no. 1, pp. 1027–1038. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.09.030.
7. Sayed A.E., Emad Z.I., Osama M.M., Mohamed A.A. Heat transfer characteristics of staggered wing-shaped tubes bundle at different angles of attack. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, vol. 51, no. 7, pp. 1091–1102. DOI: 10.1007/s00231-014-1323-3.
8. Sayed A.E., Emad Z.I., Osama M.M., Mohamed A.A. Effect of attack and cone angles on air flow characteristics for staggered wing shaped tubes bundle. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, no. 1, pp. 1001–1016. DOI: 10.1007/s00231-014-1473-3.
9. Zhukauskas A., Ulinskas R.V. Efficiency parameters of heat transfer in tube banks. *Heat Transfer Engineering*, 1985, vol. 6, no. 1, pp. 19–25. DOI: 10.1080/01457638508939614.
10. Zhukauskas A. Heat transfer from tubes in cross-flow. *Advances in Heat Transfer*, 1972, vol. 8, pp. 93–160. DOI: 10.1016/S0065-2717(08)70038-8.
11. Deeb R., Sidenkov D.V. Numerical simulation of the heat transfer of staggered drop-shaped tubes bundle. *IOP Conference Series: Journal of Physics*, 2019, vol. 1359, p. 012135. DOI: 10.1088/1742-6596/1359/1/012135.
12. Deeb R., Sidenkov D.V. Investigation of flow characteristics for drop-shaped tubes bundle using Ansys package. *2020 V International Conference on Information Technologies in Engineering Education (Inforino)*, Moscow, 2020, pp. 1–5. DOI: 10.1109/Inforino48376.2020.9111775.
13. Deeb R., Sidenkov D.V. Calculation of radiation heat transfer in staggered drop-shaped tubes bundle. *IOP Conference Series: Journal of Physics*, 2019, vol. 1565, p. 012043. DOI: 10.1088/1742-6596/1565/1/012043.
14. Deeb R., Sidenkov D.V. Chislennoe issledovanie teploobmena i aerodinamiki odinochnykh trub kaplevidnoi formy [Numerical investigation of heat transfer and aerodynamics of single drop-shaped tubes]. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda = Journal of International Academy of Refrigeration*, 2020, no. 3, pp. 91–99.
15. Deeb R. Effect of longitudinal spacing on the flow and heat transfer for staggered drop-shaped tubes bundle in cross-flow. *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2020, vol. 21, N 1. DOI: 10.33257/PhChGD.21.1.878.
16. Terekh M., Rudenko A.I., Zhukova Y.V. Aerodynamic drag to flows about single drop-like tubes and visualization of these flows. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2013, vol. 86, no. 2, pp. 378–384. Translated from *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*, 2013, vol. 86, no. 2, pp. 358–364.
17. Jafari H.H., Dehkordi B. G. Numerical prediction of fluid-elastic instability in normal triangular tube bundles with multiple flexible circular cylinders. *Journal of Fluids Engineering*, 2013, vol. 135, no. 3, p. 031102. DOI: 10.1115/1.4023298.
18. Priyank D.P., Karnav N S., Kush V. M., Chetan O.Y. CFD analysis of heat exchanger over a staggered tube bank for different angle arrangement of tube bundles. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 2013, no. 1, pp. 2278–0181.
19. Orszag S.A., Yakhot V., Flannery W.S., Boysan F. Renormalization group modeling and turbulence simulations. *Near-Wall Turbulent Flows*, Tempe, AZ, 1993.
20. ANSYS Fluent Reference Guide 16.0. 2015.
21. Tsvetkov F.F., Kerimov R.V., Velichko V.I. *Zadachnik po teplomassoobmenu* [Problem book in heat and mass transfer]. Moscow, MEI Publ., 2008. 196 p.
22. Webb R. Performance evaluation criteria for use of enhanced heat transfer surfaces in heat exchanger design. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1981, vol. 24, no. 4, pp. 715–726.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Дееб Равад – родился в 1990 году, ассистент кафедры машиностроения, Университет Дамаска (Сирия, Дамаск), аспирант и ассистент кафедры теоретических основ теплотехники, Национальный исследовательский университет «МЭИ». Область научных интересов: разработка и реализация численных и математических моделей для моделирования задач гидродинамики и теплопередачи пучков труб, используемых в теплообменнике, инновационные технологии энергосбережения и повышения энергетической эффективности. Опубликовано 15 научных работ. (Адрес: 111250, Россия, Москва, Красноказарменная, 14. E-mail: e.rawad.deeb@yandex.com).

Deeb Rawad (b. 1990) – assistant of General Mechanic Engineering Department, Damascus University (Damascus, Syria), Ph.D. student of Theoretical Bases of Heat Engineering Department, National Research University (Moscow Power Engineering Institute). His research interests are currently focused on development and implementation of numerical and mathematical models for modeling hydrodynamics and heat transfer problems of tube bundles used in heat exchangers, innovative technologies for energy-saving, and energy-efficient equipment. He is author of 15 scientific papers. (Address: 14, Krasnokazarmennaya, Moscow, 111250, Russia. E-mail: e.rawad.deeb@yandex.com).

*Статья поступила 11 мая 2020 г.
Received may 11, 2020*

To references:

Deeb R. Vliyanie ugla ataki na teploobmennye i gidrodinamicheskie kharakteristiki shakmatnogo puchka trub kaplevidnoi formy v poperechnom obtekanii [Effect of angle of attack on heat transfer and hydrodynamic characteristics for staggered drop-shaped tubes bundle in cross-flow]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2020, no. 3 (48), pp. 21–36. DOI: 10.17212/1727-2769-2020-3-21-36 .

УДК 621.537.85

ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНДУКТИВНО-КОНДУКТИВНЫХ НАГРЕВАТЕЛЕЙ

А.И. Елшин¹, В.В. Кожухов², П.А. Елшин³

¹Арктический государственный агротехнологический университет, г. Якутск

²Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск

³ООО «Сибполимерстрой», г. Новосибирск

В статье представлены конструктивные особенности индуктивно-кондуктивных нагревателей, определены взаимосвязи между электромагнитными нагрузками, свойствами материала и размерами теплообменника, приведены результаты составления универсальной зависимости основных параметров индуктивно-кондуктивных нагревателей в функции теплопроизводительности, частоты и величины напряжения. В качестве констант проектирования приняты величины, определяемые свойствами и стоимостью материалов, условиями нагревостойкости и электробезопасности, технологическими возможностями производства и условиями эксплуатации. Эти величины выбираются в начале проектирования и сохраняются постоянными до получения результатов расчета приемлемых основных размеров устройства. Получены номограммы зависимости толщины стенки камеры нагрева от величины плотности тока и теплового потока. Выбор оптимального результата проектирования осуществляется путем экономической оценки исследуемых вариантов с точки зрения минимизации затрат на производство и потерь электроэнергии при эксплуатации электронагревателя. Приведен алгоритм проектирования главных размеров однофазных и трехфазных индуктивно-кондуктивных нагревателей мощностью от 1 до 250 кВт в единице изделия на напряжение 0,4 кВ и частотой 50 Гц и представлены результаты расчета основных массо-стоимостных показателей. Анализ расчетных данных свидетельствует о предпочтительности электронагревателей с большей теплопроизводительностью с точки зрения удельной стоимости и удельной массы. В то же время относительные капитальные затраты средств на единицу массы изделия остаются практически постоянными.

Ключевые слова: индуктивно-кондуктивный нагреватель, алгоритм расчета, оптимальные параметры, массо-стоимостные показатели.

DOI: 10.17212/1727-2769-2020-3-37-51

Введение

Индуктивно-кондуктивный нагреватель проектируется в соответствии с требованиями ГОСТ [1–4] и должен обладать высокими энергетическими характеристиками, приемлемыми массогабаритными показателями, быть удобным в эксплуатации, простым и дешевым в производстве. Достижение определенных качеств индуктивно-кондуктивного нагревателя обуславливается рациональным выбором основных размеров, а также соответствующих удельных нагрузок активных материалов – плотности тока в первичной обмотке и теплообменнике и индукции в сердечнике.

Важное значение имеет культура производства, технологический процесс изготовления индуктивно-кондуктивного нагревателя и квалификация производственного персонала, способного корректно изменять соотношения основных геометрических параметров устройства с учетом свойств используемых материалов.

1. Описание объекта

Новая конструктивная схема индуктивно-кондуктивного нагревателя (рис. 1), используемая в качестве основной, содержит магнитопровод 1 с первичными обмотками 2, теплообменник 3 в виде камеры нагрева из двух concentрических электропроводящих цилиндров, образующих щелевой канал для теплоносителя, а также присоединительные патрубки 4, электромагнитный пускатель 5, блок-терморегулятор 6.

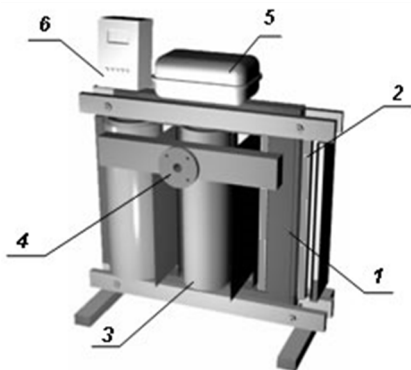


Рис. 1 – Общий вид индуктивно-кондуктивного нагревателя

Fig. 1 – General view of a three-phase inductive-conductive heater

Камера расположена соосно первичной обмотке 2 и отделена от нее воздушным промежутком, величина которого связана как уровнем электробезопасности обслуживания, так и тепловым режимом функционирования обмотки.

При подключении обмоток к первичной сети промышленной частоты в магнитопроводе создается магнитный поток, который *индуктивным* путем наводит во вторичной обмотке – камере нагрева токи порядка нескольких килоампер при низком напряжении, не превышающем 2 В. Под

действием джоулевых потерь в камере нагрева выделяется тепло, нагревающее *кондуктивным* способом любой теплоноситель – твердый, жидкий или газообразный.

При проектировании определяются главные размеры индуктивно-кондуктивного нагревателя для ряда мощностей на стержень магнитопровода.

В данной работе рассматриваются вопросы создания алгоритма поискового расчета основных геометрических размеров:

- внутреннего диаметра обмотки D ,
- высоты обмотки h ,
- радиального размера первичной обмотки b ,
- толщины стенки теплообменника a .

В качестве исходных данных для проектирования приняты следующие.

- 1) теплопроизводительность нагревателя Q , Вт;
- 2) число фаз m ;
- 3) частота f , Гц;
- 4) номинальное первичное напряжение U , В.

В качестве констант проектирования приняты величины, определяемые свойствами и стоимостью материалов, условиями нагревостойкости и электробезопасности, технологическими возможностями производства и условиями эксплуатации.

К ним относятся:

- 1) максимальная индукция в стержне B_m , температура T и коэффициент заполнения сталью k_c ;
- 2) плотность тока в первичной обмотке Δ , А/м²;
- 3) средняя плотность тока в стенках теплообменника Δ_t , А/м² или средняя плотность теплового потока от стенок теплообменника к теплоносителю q_s , Вт/м².

Эти величины выбираются в начале проектирования и сохраняются постоянными до получения результатов расчета приемлемых основных размеров устройства.

Для всей серии сохраняются активные материалы: первичная обмотка из алюминиевого провода марки АПСД с прямоугольным сечением провода и двухслойной изоляцией из стекловолкна с подклейкой и пропиткой нагревостойким лаком с допустимым температурным диапазоном от -60 до $+155$ °С, материал теплообменника – нержавеющая немагнитная сталь марки 12Х18Н10Т толщиной 1...10 мм, сердечник магнитопровода из холоднокатаной анизотропной электротехнической стали марки 3405–3413 (ГОСТ 21427.1–83) с толщиной листов 0,35 мм. Удельные потери в стали при индукции 1,5 Т составляют 1,3...1,5 Вт/кг.

Выбор оптимального результата проектирования осуществляется путем экономической оценки исследуемых вариантов с точки зрения минимизации затрат на производство и потерь электроэнергии при эксплуатации электронагревателя.

2. Определение взаимосвязи между электромагнитными нагрузками, свойствами материала и размерами теплообменника

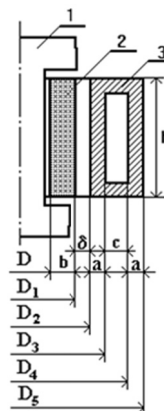
Основные геометрические размеры, расчет которых необходимо произвести, приведены на рис. 2.

Рис. 2 – Размеры индуктивно-кондуктивного нагревателя:

1 – магнитопровод; 2 – обмотка; 3 – теплообменник

Fig. 2 – Dimensions of inductive-conductive heater:

1 – magnetic circuit; 2 – winding; 3 – heat exchanger



На первом этапе проектирования определяются пределы изменения толщины стенки теплообменника a при заданных свойствах материала ρ_t , Ом · м, и величине теплового потока q_s , Вт/м², с поверхности камеры нагрева.

Для этого получим соотношение между этими величинами при условии теплообмена только с внутренней поверхности теплообменника, обращенной к теплоносителю. Теплоотдачей от верхней и нижней торцевых крышек теплообменника пренебрегаем ввиду малости поверхности.

Плотность теплового потока q_s можно рассчитать как отношение теплового потока к общей площади поверхности теплообменника, обращенной к теплоносителю:

$$q_s = \frac{Q}{\pi(D_3 + D_4)h} \quad (1)$$

Активная мощность по закону Джоуля–Ленца, выделенная в двух стенках при протекании тока,

$$Q = \Delta_t^2 \cdot h \cdot a \cdot \rho_t \cdot \pi(D_3 + D_4) \quad (2)$$

Объединяя выражения (1) и (2), устанавливаем связь между плотностью теплового потока, плотностью тока, удельной электропроводностью и толщиной стенки теплообменника:

$$q_s = \Delta_t^2 \cdot a \cdot \rho_t \quad (3)$$

Этот вывод примечателен тем, что величина удельного теплового потока не зависит от высоты теплообменника h и диаметра цилиндрической поверхности D , а определяется только толщиной стенки a и величиной плотности тока Δ_t .

Для использования в последующих расчетах построим спектр значений толщин стенки a теплообменника из нержавеющей стали при различных q_s и вариациях плотности тока в стенке камеры нагрева Δ_t (рис. 3).

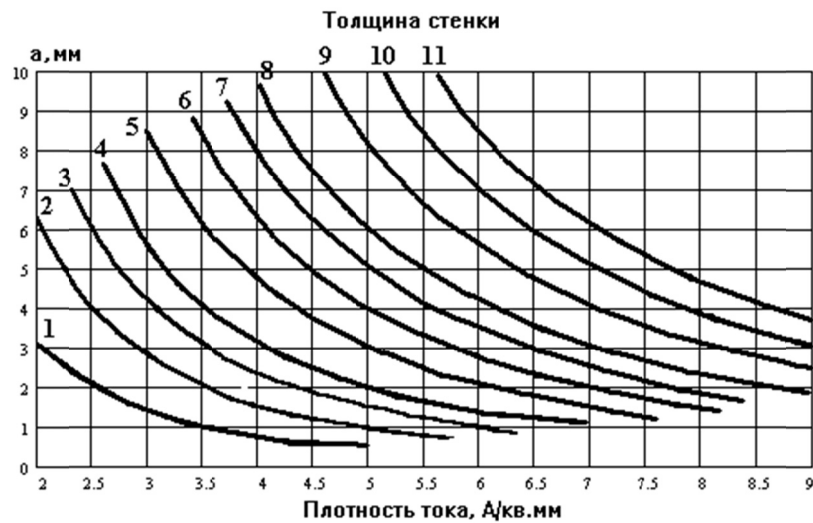


Рис. 3 – Номограмма области толщины стенки теплообменника

Fig. 3 – Nomogram of the heat exchanger wall thickness region

Линии 1–4 соответствуют плотности теплового потока 1, 2, 3, 4 Вт/см², 5–8 – построены при плотности потока 6, 8, 10, 12 Вт/см², 9–11 – по плотности 16, 20, 24 Вт/см². Область значений толщин a лежит в интервале 1...10 мм, что вполне приемлемо при реализации устройств мощностью 1...250 кВт и давлении 1...4 МПа.

Выбор расчетной точки определяется требуемым значением теплового потока по условию оптимальной теплоотдачи и уровнем перегрева теплообменника по отношению к теплоносителю, а толщина стенки – условиями технологии производства и эксплуатации.

Теплообменник, выполненный из другого металла, имеет иное соотношение плотности потока и плотности тока и требует корректировки толщины стенок. Однако и в этом случае выбор требуемого параметра a не вызывает затруднений с использованием выражения (3).

3. Расчет внутреннего диаметра первичной обмотки

Теплопроизводительность индуктивно-кондуктивного нагревателя и потребляемая мощность связаны между собой коэффициентом полезного действия η и

коэффициентом мощности. Считая коэффициент мощности близким к единице, что соответствует действительности, из выражения для q_s получим

$$q_s = \frac{U \cdot I \cdot \eta}{h \cdot \pi (D_3 + D_4)}. \quad (4)$$

Приложенное к первичной обмотке напряжение связано с ЭДС выражением

$$U = 4.44 \cdot f \cdot B_m \cdot S_c \cdot W,$$

где W – число витков обмотки; $S_c = k_c \frac{\pi d^2}{4}$ – активное сечение стержня; d – расчетный диаметр стержня магнитопровода; $k_c = k_z \cdot k_{fe}$ – коэффициент заполнения площади круга; k_z – коэффициент заполнения площади круга ступенчатой фигурой; k_{fe} – коэффициент заполнения площади ступенчатой фигуры сталью.

Ток запишем как произведение плотности тока в первичной обмотке на сечение проводника:

$$I = D \cdot s_{\text{пр}}.$$

С учетом того, что общая площадь сечения проводников обмотки равна

$$s_{\text{пр}} \cdot W = h \cdot b \cdot k_3, \quad (5)$$

где k_3 – коэффициент заполнения сечения обмотки алюминием, находим

$$q_s = \frac{KD^2 \Delta b k_3 \eta}{D_3 + D_4}, \quad (6)$$

где коэффициент

$$K = 1.11 f B_m k_c.$$

Заменим толщину стенок теплообменника a в выражении (3), отмечая, что ток теплообменника равен IW и плотность тока в теплообменнике равна Δ_t , откуда с учетом (5)

$$a = \frac{\Delta \cdot b \cdot k_3}{2\Delta_t}. \quad (7)$$

Подставим в левую часть выражения (6) вместо q_s соотношение (3) с учетом (7) и, выделяя параметры геометрии индуктивно-кондуктивного нагревателя, получим

$$\frac{D^2}{D_3 + D_4} = \frac{\Delta_t \rho_t}{2K\eta}. \quad (8)$$

Для главных размеров индуктивно-кондуктивного нагревателя введем следующие соотношения:

$k_b = b/D$ – отношение радиального размера к внутреннему диаметру обмотки;

$k_\delta = \delta/D$ – отношение зазора между обмоткой к внутреннему диаметру обмотки;

$k_k = c / D$ – отношение ширины кольцевого канала теплообменника к внутреннему диаметру обмотки.

Диаметральная размерная цепь индуктивно-кондуктивного нагревателя в соответствии с рис. 2 представлена следующим образом:

$$D_4 = D_3 + 2c = D + 2b + 2\delta + 2a + 2c, \quad (9)$$

что позволяет произвести замену в выражении (8) и получить обобщенную формулу к расчету внутреннего диаметра первичной обмотки.

$$D = \frac{\Delta_t \rho_l}{K \eta} \left[1 + \left(2 + \frac{\Delta}{\Delta_t} k_3 \right) k_b + 2k_\delta + k_k \right]. \quad (10)$$

Эта основная функциональная зависимость позволяет далее по известному значению D найти радиальный размер магнитопровода d , толщину обмотки b , зазор между обмоткой и теплообменником δ , толщину стенки a и ширину кольцевого канала с теплообменника, число витков первичной обмотки W , высоту h и активное сечение S_c стержня магнитопровода. Нетрудно рассчитать массу стержня и ярем магнитопровода G_c и массу обмотки G_o , а также стоимость активных материалов, используемых для изготовления электронагревателя индуктивно-кондуктивного типа, и произвести массогабаритный и стоимостной анализ.

4. Расчет главных размеров однофазных нагревателей

Главные размеры однофазных нагревателей будем отыскивать для конструктивной схемы, представленной на рис. 4 с сердечником стержневого типа, на котором размещены две одинаковые обмотки, подключаемые последовательно к напряжению сети. Такое конструктивное построение позволяет снизить удельные массовые характеристики без изменения энергетических показателей.

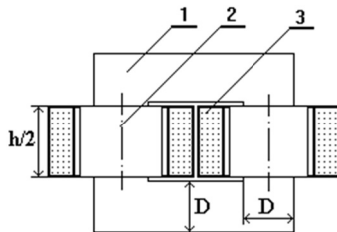


Рис. 4 – Конструктивная схема однофазного нагревателя со стержневым сердечником:

1 – сердечник; 2 – обмотка; 3 – теплообменник

Fig. 4 – Structural diagram of a single-phase heater with a rod core;

1 – core; 2 – winding; 3 – heat exchanger

Исходные данные для расчета однофазных индуктивно-кондуктивных нагревателей:

- 1) напряжение фазное – 230 В;
- 2) частота – 50 Гц;
- 3) электрический КПД – 0,97;
- 4) максимальная индукция в стержне – 1,5 Т;
- 5) коэффициент заполнения сечения стержня сталью – 0,96;
- 6) удельное электрическое сопротивление материала теплообменника – 0,8 Ом · мм²/м.

Предварительный выбор основных постоянных величин для проектирования определен существующей практикой трансформаторостроения, а также практикой и опытом конструирования, производства и эксплуатации электронагревателей индуктивно-кондуктивного типа, осуществленных в течение тридцати лет группой авторов [5–11].

В частности, значение коэффициента заполнения обмотки проводниковым материалом обусловлено использованием провода АПСД с прямоугольным сечением провода и двусторонней изоляцией 0,3...0,35 мм и межслоевой изоляцией на основе стеклотолы толщиной 0,15...0,2 мм. Значение средней плотности тока в теплообменнике принято по условию допустимого перегрева стенок по отношению к теплоносителю и уровню теплового потока от стенок.

Коэффициенты, связывающие между собой главные размеры, определены по экономической оценке и уровню электробезопасности, которая требует введения зазора между первичной обмоткой и теплообменником не менее 3 мм. При устройстве дополнительной теплоизоляции теплообменника эта величина может быть изменена в большую сторону, что необходимо учесть при проектировании высокотемпературных нагревателей.

Алгоритм расчета главных размеров следующий.

На первом этапе выбирается плотность тока в первичной обмотке 2,2...2,0 А/мм². Выбор средней плотности тока в первичной обмотке определяет как массу и объем обмотки, так и величину электрических потерь в ней. На этом этапе расчета главных размеров эта величина задается ориентировочно, основываясь на рекомендациях [10] и опыта эксплуатации подобных устройств [11]. Действительное значение плотности тока в первичной обмотке будет получено впоследствии по уточненному расчету электронагревателя по известным основным размерам.

Далее по выбранному значению температуры перегрева стенки камеры нагрева по отношению к теплоносителю и коэффициента теплоотдачи определяется плотность теплового потока

$$q_s = \Delta T_c \cdot \alpha, \quad (11)$$

где ΔT_c может быть выбрано в пределах 30...40 К; $\alpha = 500 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ – коэффициент теплоотдачи с поверхности теплообменника.

По величине плотности теплового потока и номограмме (рис. 3) выбирается плотность тока в стенке теплообменника Δ_t . По формуле (10) рассчитываются главные размеры индуктивно-кондуктивного нагревателя. Здесь для мощностей от 1 до 4 кВт коэффициенты находятся в следующих пределах:

$$k_b = 0,15 \dots 0,2;$$

$$k_s = 0,08 \dots 0,1;$$

$$k_k = 0,08 \dots 0,1;$$

$$k_3 = 0,6 \dots 0,7.$$

По формуле (3) рассчитывается толщина стенки теплообменника

$$a = \frac{q_s}{\Delta_t^2 \cdot \rho_t}.$$

Формируется конфигурация активной части электронагревателя: магнитопровода и обмотки. Диаметр активного сечения стержня магнитопровода для проведения магнитного потока рассчитывается с учетом изоляционного промежутка ε между магнитопроводом и обмоткой (обычно $\varepsilon = 3 \text{ мм}$):

$$d = D - 2\varepsilon.$$

Опыт показывает, что, для однофазных электронагревателей мощностью 1...4 кВт, исходя из условий затрат на технологическую оснастку и трудоемкость сборочного производства магнитопровода, можно рекомендовать число ступеней

в сечении стержня магнитопровода, равное 1...2 (рис. 5). Коэффициент заполнения площади круга ступенчатой фигурой $k_z = 0,637; 0,785$.

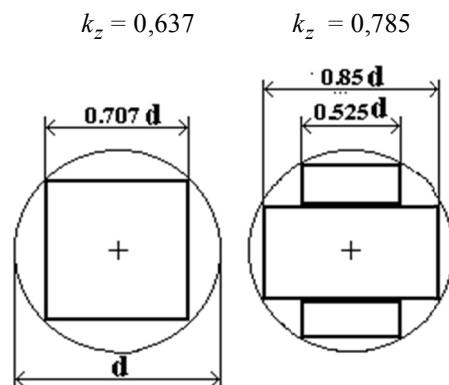


Рис. 5 – Одно- и двухступенчатый сердечники
Fig. 5 – One- and two-stage cores

Толщина обмотки

$$b = k_b \cdot D.$$

Зазор между обмоткой и теплообменником

$$\delta = k_\delta \cdot D.$$

Ширина канала камеры нагрева

$$c = k_k \cdot D.$$

Радиальные размеры обмотки и теплообменника:

$$D_1 = D + 2b; \quad D_2 = D_1 + 2\delta; \quad D_3 = D_2 + 2a;$$

$$D_4 = D_3 + 2c; \quad D_5 = D_4 + 2a.$$

Площадь сечения стержня

$$S_c = k_c \frac{\pi d^2}{4}.$$

Число витков обмотки

$$W = \frac{U \cdot k_c}{4K \cdot S_c}.$$

Высота обмотки определится по формуле

$$h = \frac{P}{4,44 \cdot f \cdot B_m \cdot S_c \cdot \Delta \cdot b \cdot k_3}.$$

Предварительная оценка температуры перегрева обмотки

Плотность теплового потока с поверхности обмотки

$$q_0 = \frac{1}{2} \Delta^2 \cdot b \cdot \rho_0 \cdot k_3,$$

где $\rho_0 = 0,027 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ – удельное сопротивление алюминиевого материала обмотки.

Температура перегрева обмотки по отношению к окружающей среде

$$\Delta T_0 = \frac{q_0}{\alpha_0},$$

где $\alpha_0 = 5 \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$ – коэффициент теплоотдачи с поверхности обмотки.

Массу активных материалов определим по конструктивной схеме (рис. 5).

Масса стержня

$$G_c = h \cdot S_c \cdot \gamma_{FE},$$

где $\gamma_{FE} = 7,65 \cdot 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3$ – удельная плотность электротехнической стали.

Масса двух ярем

$$G_a = 2S_c \cdot \gamma_{FE} (D + D_5).$$

Стоимость электротехнической стали

$$C_{FE} = (G_c + G_a) c_f,$$

где c_f , руб/кг, – цена электротехнической стали.

Масса обмоточного провода

$$G_0 = h \cdot b \cdot \gamma_0 \cdot k_3 \cdot \pi \frac{D + D_1}{2},$$

где $\gamma_0 = 2,7 \cdot 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3$ – удельная плотность обмоточного провода.

Стоимость обмоточного провода

$$C_0 = G_0 \cdot c_0,$$

где c_0 , руб/кг, – цена обмоточного провода АПСД.

Масса теплообменника

$$G_t = h \cdot a \cdot \gamma_{FE} \cdot \pi \frac{D_2 + D_3 + D_4 + D_5}{2}.$$

Стоимость материала теплообменника

$$C_t = G_t \cdot c_t,$$

где c_t , руб/кг, – цена материала теплообменника.

Масса активных материалов

$$G = G_c + G_a + G_0 + G_t.$$

Стоимость активных материалов

$$C = C_c + C_a + C_0 + C_t.$$

Пример расчета минимизации массы и существующей стоимости активных материалов индуктивно-кондуктивного нагревателя с одно- и двухступенчатым магнитопроводом мощностью 1 кВт при вариации плотности тока в теплообменнике от 1,75 до 3,0 А/мм² выявил следующие массо-стоимостные характеристики (рис. 6, а, б).

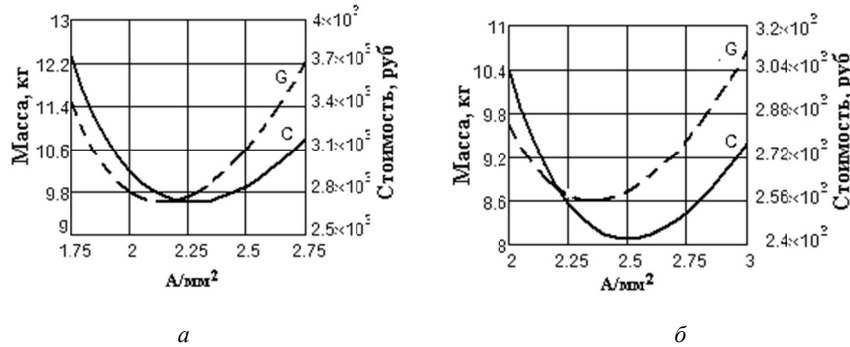


Рис. 6 – Масса и стоимость активных материалов индуктивно-кондуктивного нагревателя мощностью 1 кВт:

а – с одноступенчатым магнитопроводом; б – с двухступенчатым магнитопроводом

Fig. 6 – Weight and cost of active materials of an inductive-conductive heater with a power of 1 kW:

a – with a single-stage magnetic circuit; b – with a two-stage magnetic circuit

Анализ показывает, что увеличение числа ступеней приводит к снижению общей массы и стоимости изделия. Выбор оптимальной плотности тока в теплообменнике (ТО) с одноступенчатым магнитопроводом может быть принят для последующих уточненных расчетов в пределах 2,2...2,25 А/мм², с двухступенчатым – 2,35...2,45 А/мм².

В табл. 1 приведены оптимальные параметры индуктивно-кондуктивного нагревателя мощностью 1 кВт с одно- и двухступенчатым магнитопроводом. Коэффициенты: $k_b = 0,2$; $k_\delta = 0,08$; $k_k = 0,08$; $k_z = 0,6$.

Таблица 1 / Table 1

Оптимальные параметры индуктивно-кондуктивного нагревателя мощностью 1 кВт
Optimal parameters of an inductive-conductive heater with a power of 1 kW

Наименование	Ед. изм.	Величина		
Количество ступеней магнитопровода		1	2	
Плотность тока теплообменника	А/мм ²	2,22	2,45	
Внутренний диаметр обмотки D	мм	63	56	
Толщина стенки ТО a	мм	4,44	3,65	
Толщина обмотки b	мм	13	11	
Внешний диаметр обмотки D_1	мм	89	79	
Зазор обмотка-магнитопровод δ	мм	5,0	4,5	
Радиальные размеры ТО	D_2		99	88
	D_3	мм	108	95
	D_4		118	104
	D_5		127	111
Ширина канала для теплоносителя c	мм	5,1	4,5	

Окончание табл. 1

The end Table 1

Наименование	Ед. изм.	Величина	
Диаметр стержня d	мм	57	50
Сечение стержня S_c	мм ²	1922	1875
Число витков W		359	368
Высота обмотки h	мм	94	108
Перегрев обмотки ΔT_0	К	99	88
Масса стержней магнитопровода G_c	кг	1,376	1,546
Масса ярем магнитопровода G_a	кг	5,582	4,812
Масса магнитопровода G_{FE}	кг	6,957	6,358
Масса обмотки G_0	кг	0,457	0,417
Масса ТО G_t	кг	2,248	1,88
Масса активных материалов G	кг	9,663	8,655
Удельная масса g	кг/кВт	9,663	8,655
Стоимость электротехнической стали C_{FE}	руб.	1739	1589
Стоимость обмоточного провода C_0	руб.	92	84
Стоимость материала ТО C_t	руб.	899	752
Стоимость активных материалов C	руб.	2730	2425
Удельная стоимость материалов c_p	руб/кВт	2730	2425

5. Расчет главных размеров трехфазных нагревателей

Основные параметры трехфазных трансформаторов-нагревателей находим для конструктивной схемы броневых трансформатора (рис. 7), у которого исходными данными для расчета являются:

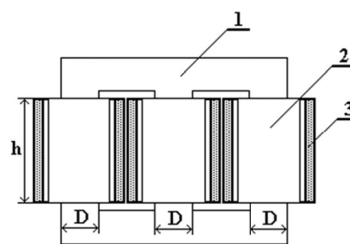
- 1) напряжение – 230/400 В;
- 2) частота – 50 Гц;
- 3) диапазоны мощности: 5,0...20,0 кВт; 50,0...100,0 кВт; 150,0...250,0 кВт.

Рис. 7 – Трехфазный электронагреватель с броневым сердечником:

1 – магнитопровод; 2 – обмотка; 3 – теплообменник

Fig. 7 – Three-phase electric heater with an armored core;

1 – magnetic core; 2 – winding; 3 – heat exchanger



В качестве независимой переменной принята средняя плотность тока (поверхностная плотность теплового потока) в теплообменнике.

Обмотка выполняется цилиндрической многослойной, намотанная одним или несколькими параллельными проводами прямоугольного сечения марки АПСД.

Для трехфазных электронагревателей можно рекомендовать число ступеней в сечении стержня магнитопровода, равное 3, 4, 5 в зависимости от мощности что соответствует коэффициенту заполнения круга ступенчатой фигурой 0,851, 0,886, 0,908 (рис. 8).

При расчете главных размеров оптимального варианта трехфазного индуктивно-кондуктивного нагревателя использованы вышеприведенные аналитические зависимости и получены массо-стоимостные характеристики (табл. 2).

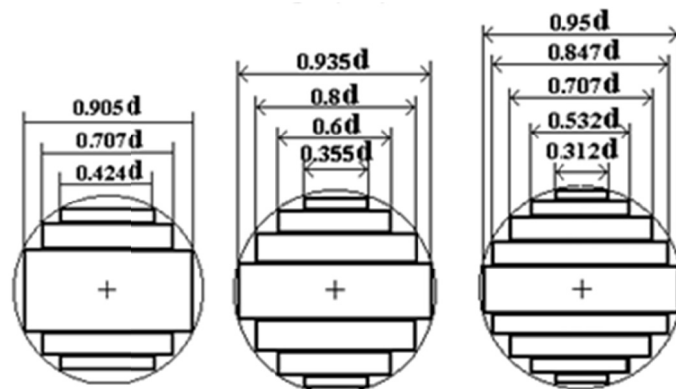


Рис. 8 – Трех-, четырех- и пятиступенчатый сердечники

Fig. 8 – Three-, four- and five-stage cores

Таблица 2 / Table 2

**Основные характеристики ряда
трехфазных индуктивно-кондуктивных нагревателей**

Параметр	Мощность, кВт			
	10.0	50.0	100.0	250,0
Число ступеней стержня магнитопровода	2	3	3	5
Плотность тока обмотки Δ , А/мм ²	2.0	2.0	2.0	1.0
Плотность тока теплообменника Δ_t , А/мм ²	3.4	3.5	3.65	6,55
Перегрев обмотки ΔT_0 , К	79	77	77	76
Масса активных материалов G , кг	46.7	170	275	432
Стоимость активных материалов C , тыс. руб.	12,7	45,3	72,9	153
Удельная масса g , кг/кВт	4.67	3,38	2.75	2.33
Удельная стоимость c_p , руб/кВт	1270	906	729	612

Заключение

В работе проведен синтез обобщенного выражения для поиска внутреннего диаметра обмоточных структур индуктивно-кондуктивных нагревателей на основе укрупненных исходных данных. Это позволило осуществить конструктивное проектирование ряда однофазных и трехфазных нагревателей на мощности от 1 до 250 кВт, отвечающих критерию нагревостойкости.

Анализ расчетных данных свидетельствует о предпочтительности с точки зрения удельной стоимости и удельной массы электронагревателей с большей теплопроизводительностью. В то же время относительные капитальные затраты средств на единицу массы изделия остаются практически постоянными, в пределах 35...39 руб/кг.

Полученные массо-стоимостные показатели могут быть использованы для дальнейших поверочных расчетов с целью создания нормативно-технологической базы конструкторской документации для организации промышленного производства индуктивно-кондуктивных нагревателей.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 12.1.019–79. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты: дата введения 1980–07–01. – М.: Изд-во стандартов, 2001. – 6 с.
2. ГОСТ 12.1.038–82. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений и токов: дата введения 1983–07–01. – М.: Стандартиформ, 2006. – 7 с.
3. ГОСТ 12.1.002–84. Электрические поля промышленной частоты. Допустимые уровни напряженности и требования к проведению контроля на рабочих местах: дата введения 1986–01–01. – М.: Стандартиформ, 2009. – 8 с.
4. ГОСТ 12.1.004–91. Пожарная безопасность. Общие требования. – М.: Стандартиформ, 2006. – 67 с.
5. **Лейтес Л.В.** Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов. – М.: Энергия, 1981. – 392 с.
6. **Домбровский В.В., Хуторецкий Г.М.** Основы проектирования электрических машин переменного тока. – Л.: Энергия, 1974. – 504 с.
7. **Сергеев П.С., Виноградов Н.В., Горяинов Ф.А.** Проектирование электрических машин. – М.: Энергия, 1969. – 632 с.
8. Трансформаторы силовые общего назначения до 35 кВ включительно. Технический справочник. – М.: Стандартэлектро, 1993.
9. **Тихомиров П.М.** Расчет трансформаторов. – М.: Энергия, 1968. – 456 с.
10. **Туровский Я.** Электромагнитные расчеты элементов электрических машин. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 200 с.
11. **Елшин А.И.** Конструкции и расчет трансформаторных устройств низкотемпературного нагрева для жизнеобеспечения человека. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. – 140 с.

FUNDAMENTALS OF DESIGNING INDUCTIVE-CONDUCTIVE HEATERS

Elshin A.I.¹, Kozhukhov V.V.², Elshin P.A.³

¹*Arctic State Agrotechnology University, Yakutsk, Russia*

²*Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia*

³*SibPolymerStroy LLC, Novosibirsk, Russia*

The article presents the design features of inductive-conductive heaters, determines the relationship between electromagnetic loads, material properties and dimensions of the heat exchanger, presents the results of compiling a universal dependence of the main parameters of inductive-conductive heaters as a function of heat output, frequency and voltage value. Values determined by the properties and cost of materials, conditions of heat resistance and electrical safety, technological capabilities of production and operating conditions are taken as design constants. These values are selected at the beginning of the design and remain constant until the results of the calculation of the acceptable basic dimensions of the device are obtained. Nomograms of the dependence of the wall thickness of the heating chamber on the value of the current density and heat flux were obtained. The choice of the optimal design result is carried out by means of an economic assessment of the investigated options from the point of view of minimizing the cost of production and losses of electricity during the operation of the electric heater. An algorithm for designing the main dimensions of single-phase and three-phase inductive-conductive heaters with a capacity of 1 to 250 kW per unit of a product for a voltage of 0.4 kV and a frequency of 50 Hz is given and the results of calculating the main mass-cost indicators are presented. The analysis of the calculated data indicates the preference of electric heaters with a higher heat output in terms of specific cost and specific weight. At the same time, the relative capital costs of funds per unit mass of the product remain practically constant.

Keywords: inductive-conductive heater, calculation algorithm, optimal parameters, weight and cost indicators.

DOI: 10.17212/1727-2769-2020-3-37-51

REFERENCES

1. GOST 12.1.019–79. *Elektrobezopasnost'. Obshchie trebovaniya i nomenklatura vidov zashchity* [State Standard 12.1.019–79. Occupational safety standards system. Electric safety. General requirements and nomenclature of kinds of protection]. Moscow, Standards Publ., 2001. 6 p.
2. GOST 12.1.038–82. *Elektrobezopasnost'. Predel'no dopustimye znacheniya napryazhenii i tokov* [State Standard 12.1.038–82. Occupational safety standards system. Electric safety. Maximum permissible values of pick-up voltages and currents]. Moscow, Standards Publ., 2001. 8 p.
3. GOST 12.1.002–84. *Elektricheskie polya promyshlennoi chastoty. Dopustimye urovni napryazhennosti i trebovaniya k provedeniyu kontrolya na rabochikh mestakh* [State Standard 12.1.002–84. Occupational safety standards system. Power frequency electric fields. Permissible levels of field strength and requirements for control at work-places]. Moscow, Standartinform Publ., 2009. 7 p.
4. GOST 12.1.004–91. *Pozharnaya bezopasnost'. Obshchie trebovaniya* [State Standard 12.1.004–91. Occupational safety standards system. Fire safety. General requirements]. Moscow, Standartinform Publ., 2006. 67 p.
5. Leites L.V. *Elektromagnitnye raschety transformatorov i reaktorov* [Electromagnetic calculations of transformers and reactors]. Moscow, Energiya Publ., 1981. 392 p.
6. Dombrovskii V.V., Khutoretskii G.M. *Osnovy proektirovaniya elektricheskikh mashin peremennogo toka* [The basics of designing electric AC machines]. Leningrad, Energiya Publ., 1974. 504 p.
7. Sergeev P.S., Vinogradov N.V., Goryainov F.A. *Proektirovanie elektricheskikh mashin* [Designing electric machines]. Moscow, Energiya Publ., 1969. 632 p.
8. *Transformatory silovye obshchego naznacheniya do 35 kV vklyuchitel'no. Tekhnicheskii spravochnik* [Power transformers of general purpose up to 35 kV inclusive. Technical handbook]. Moscow, Standartelektro Publ., 1993.
9. Tikhomirov P.M. *Raschet transformatorov* [Transformers calculating]. Moscow, Energiya Publ., 1968. 456 p.
10. Turovskii Ya. *Elektromagnitnye raschety elementov elektricheskikh mashin* [Electromagnetic calculations of elements of electric machines]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986. 200 p.
11. Elshin A.I. *Konstruksii i raschet transformatornykh ustroystv nizkotemperaturnogo nagreva dlya zhizneobespecheniya cheloveka* [Designs and calculation of transformer low-temperature heating devices for human life support]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2000. 140 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Елишин Анатолий Иванович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Энергообеспечение в АПК» ФГБОУ ВО Арктический ГИТУ. Опубликовано более 140 работ в области электромеханики и электротехнологии. (Адрес: 677007, Россия, г. Якутск, Сергеляхское шоссе, 3 км, д. 3. E-mail: elhin46@mail.ru).

Elshin Anatoly Ivanovich – Doctor of Sciences (Eng.), professor of the Department of Power Supply in the Agro-Industrial Complex of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Arctic GATU. More than 140 scientific papers have been published. (Address: Sergelyakhskoe highway, 3 km, building 3, 353907, Russia, Yakutsk. E-mail: elshin46@mail.ru).



Кожухов Вячеслав Викторович – канд. техн. наук, доцент кафедры электроники и электротехники НГТУ. Опубликовано более 30 работ в области силовой электроники и электротехнологии. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: kozhukhov@corp.nstu.ru).

Kozhukhov Vyacheslav Victorovich – Candidate Sciences (Eng.), Associate Professor of the Department of Electronics and Electrical Engineering, NSTU. More than 30 papers have been published. (Address: 20, Karl Marx Av., 630073, Russia, Novosibirsk. E-mail: kozhukhov@corp.nstu.ru).



Елшин Петр Анатольевич – инженер по производству ООО «СибПолимерСтрой». Опубликовано 8 работ в области электротехнологии. (Адрес: 630096, Россия, г. Новосибирск, ул. Станционная, 38, к. 28а. E-mail: elshin@ngs.ru).

Elshin Petr Anatolievich – Production engineer at SibPolymerStroy LLC. 8 scientific papers have been published. (Address: St. Station, 38, k. 28a, Novosibirsk, Russia, 630096. E-mail: elshin@ngs.ru).

*Статья поступила 11 мая 2020 г.
Received may 11, 2020*

To references:

Elshin A.I., Kozhukhov V.V., Elshin P.A. Osnovy proektirovaniya induktivno-konduktivnykh nagrevatelei [Fundamentals of designing inductive-conductive heaters]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2020, no. 3 (48), pp. 37-51. DOI: 10.17212/1727-2769-2020-3- 37-51.

УДК 621.396.9

**ПОСТРОЕНИЕ АНАЛИТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАДИОКАНАЛА ММО
НА ОСНОВЕ АППРОКСИМАЦИИ ПОЛНОЙ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ
МАТРИЦЫ****А.А. Калачиков, Н.С. Щелкунов***ФГБОУ ВО Сибирский государственный университет телекоммуникаций
и информатики, Новосибирск, Россия*

Рассмотрена задача построения и проверки аналитической модели радиоканала ММО на основе аппроксимации полной корреляционной матрицы канала. Проверка точности модели выполнена с использованием результатов экспериментальных измерений радиоканала. Исследована аналитическая корреляционная модель радиоканалов ММО с определением параметров модели из данных, полученных в результате экспериментального измерения импульсных характеристик радиоканала ММО с центральной частотой 2.3 ГГц и полосой 100 МГц. Приводится описание реализованных моделей Кронекера и Вайхсельбергера, модели с использованием аппроксимации полной корреляционной матрицы канала суммой произведений Кронекера по алгоритму Ван Лоана и Питсаниса. Из измеренных величин вычисляются оценки полной корреляционной матрицы канала, отдельные корреляционные матрицы для построения моделей измеренных радиоканалов, вычисляется аппроксимация полной корреляционной матрицы канала. Приведены критерии качества моделирования и результаты моделирования радиоканала для различных конфигураций антенн на передающей и приемной стороне.

Ключевые слова: радиоканал ММО, экспериментальное измерение радиоканала ММО, пропускная способность, пространственная структура радиоканала, пространственная корреляция, аналитические модели радиоканалов ММО.

DOI: 10.17212/1727-2769-2020-3-52-61

Введение

Свойства радиоканала и параметры системы связи определяются условиями распространения сигналов, особенно наличием пространственной корреляции, которая зависит от конфигурации антенн, их взаимного расположения, распределения отражающих объектов между парами передающих и приемных антенн.

Использование нескольких антенн на передающей и приемной стороне привело к появлению систем связи ММО, в которых возможно значительное увеличение спектральной эффективности при передаче данных по радиоканалу [1].

Для анализа, разработки систем связи ММО и исследования алгоритмов обработки сигналов требуются модели каналов, точно отображающие свойства реальных каналов. Параметры моделей каналов определяются из экспериментальных измерений реальных каналов связи ММО [2].

Одним из возможных методов измерения импульсных характеристик радиоканала ММО является корреляционный метод с использованием зондирующих сигналов. Результаты измерений используются для последующей обработки и оценки параметров радиоканала ММО с многолучевым распространением сигналов.

При исследовании и разработке различных вариантов формирования и приема сигналов аналитические модели каналов на основе пространственной корреляции описывают матрицу канала ММО статистически в терминах корреляции между

элементами матрицы канала. Пространственная корреляция между элементами матрицы канала на передающей и приемной стороне оказывает влияние на пропускную способность канала ММО и общие характеристики системы связи. Поэтому важным является отображение пространственной корреляции между антенными элементами в моделях канала ММО [2].

Данное требование отображено в используемых аналитических моделях канала на основе заданной полной корреляционной матрицы канала. Примером таких моделей являются модели Кронекера и Вайхсельбергера. Модель Кронекера используется для описания узкополосных каналов и предполагает раздельное описание пространственной корреляции на передающей и приемной стороне. При этом число параметров модели снижается и модель может использоваться при аналитическом исследовании системы.

Для построения более точной аналитической модели канала с учетом взаимосвязи между пространственной корреляцией на передающей и приемной стороне предложена модель Вайхсельбергера [2, 3]. Данная модель является аналитической корреляционной моделью, позволяющей получить реализации канала со статистическими свойствами измеренных данных. Модель также использует одно-сторонние корреляционные матрицы в качестве параметров, но строится с учетом совместной пространственной структуры в отличие от модели Кронекера.

Целью работы является исследование аналитических корреляционных моделей радиоканалов ММО на основе данных, полученных в результате экспериментального измерения импульсных характеристик радиоканала ММО в диапазоне 2.3 ГГц. Также решается задача построения аналитической модели на основе аппроксимации полной корреляционной матрицы канала по алгоритму Ван Лоана и Питсаниса. Для подтверждения точности моделирования определяются критерии качества моделирования при различных конфигурациях антенн на передающей и приемной стороне.

1. Методы построения аналитических моделей канала ММО

Узкополосная система связи ММО, состоящая из M_T передающих и M_R приемных антенн с частотно неселективными рэлеевскими замираниями описывается выражением

$$y = Hx + n,$$

где H – матрица канала размером $M_T \times M_R$, состоящая из комплексных коэффициентов передачи между антеннами системы; x – вектор передаваемых символов размером M_T ; n – вектор отсчетов шума с нормальным распределением размером M_R . Описание узкополосной системы может быть расширено на модель широкополосного многолучевого канала с независимыми задержками [1, 2].

При отсутствии информации о состоянии канала на приемной стороне оптимальным является равномерное размещение мощности передатчика по каждой из M_T антенн передающей антенной решетки и передача каждой отдельной антенной соответствующего потока символов. В таком случае эргодическая пропускная способность канала выражается как

$$C = E \left\{ \log_2 \det \left(I + \frac{\rho}{M_T} HH^H \right) \right\},$$

где $E(\cdot)$ – операция усреднения; ρ – величина отношения сигнал/шум; $(\cdot)^H$ – операция эрмитового сопряжения матрицы.

Пропускная способность максимальна при условии ортогональности столбцов матрицы H . Наличие коррелированности между антенными элементами на передающей и приемной стороне приводит к снижению пропускной способности канала.

Корреляционные свойства канала ММО между всеми парами антенны системы определяются в виде полной корреляционной матрицы канала R_H размером $M_T M_R \times M_T M_R$, которая выражается как

$$R_H = E \left\{ \text{vec}(H) \text{vec}(H)^H \right\},$$

где $\text{vec}(H)$ означает вектор-столбец размером $M_T M_R \times 1$, состоящий из всех столбцов матрицы H , составленных один на другой.

Обобщенная аналитическая модель канала ММО на основе полной корреляционной матрицы определяется как

$$\text{vec}(H) = R_H^{-1/2} H_w,$$

где H_w – матрица размером $M_T \times M_R$, состоящая из некоррелированных случайных чисел. При описании рэлеевского радиоканала ММО матрица H_w состоит из комплексных элементов с нормальным распределением реальной и мнимой части. Модель точно воспроизводит свойства канала, но размеры полной корреляционной матрицы приводят к большой вычислительной сложности при практическом использовании модели. Для преодоления этого недостатка используется представление полной корреляционной матрицы канала произведением Кронекера двух корреляционных матриц на приемной и передающей стороне меньшей размерности.

В модели Кронекера корреляционная матрица на приемной стороне вычисляется в виде

$$R_{RX} = E \{ H H^H \},$$

на передающей стороне – в виде

$$R_{TX} = E \{ H^T H^* \}.$$

В данной модели аппроксимация полной корреляционной матрицы канала R_H выражается как произведение Кронекера матриц корреляции на передающей и приемной стороне:

$$R_H = R_{TX} \otimes R_{RX}.$$

Матрицы корреляции на приемной и передающей стороне считаются независимыми, что соответствует случаю удаленного размещения антенных решеток на передающей и приемной стороне и наличие большого числа случайных переотражателей между решетками. Получение реализаций канала выполняется в соответствии с моделью в виде

$$H_{kron} = R_{TX}^{1/2} H_w R_{RX}^{1/2},$$

где $R_{TX}^{1/2}$ и $R_{RX}^{1/2}$ – квадратный корень из корреляционных матриц на передающей и приемной стороне; H_w – матрица из элементов с комплексным гауссовым распределением.

Предположение о независимости между параметрами многолучевых компонент на передающей и приемной стороне во многих случаях приводит к потере части пространственной структуры канала связи. Модель Вайхсельбергера учитывает эту связь при помощи матрицы связности Ω , которая позволяет отобразить совместную пространственную корреляцию на передающей и приемной стороне. Модель использует декомпозицию по собственным числам корреляционных матриц на передающей и приемной стороне:

$$R_{RX} = U_{RX} \Lambda_{RX} U_{RX}^H,$$

$$R_{TX} = U_{TX} \Lambda_{TX} U_{TX}^H,$$

где U_{RX} и U_{TX} – комплексные унитарные матрицы, состоящие из собственных векторов односторонних корреляционных матриц; Λ_{TX} и Λ_{RX} – диагональные матрицы, содержащие собственные числа односторонних корреляционных матриц на приемной и передающей стороне.

Модель Вайхсельбергера позволяет получить реализации матриц канала ММО в виде

$$H_{weich} = U_{RX} (\tilde{\Omega} \cdot H_w) U_{TX}.$$

Параметры модели Вайхсельбергера вычисляются на основе односторонних корреляционных матриц, структура матрицы связи отражает пространственную структуру канала. Необходимость вычисления матрицы связи приводит к тому, что модель является более сложной по сравнению с моделью Кронекера, но при этом позволяет более точно выполнить моделирование канала ММО на основе данных измерения канала [3].

Модели Кронекера и Вайхсельбергера получили широкое распространение как в теоретических работах по изучению различных алгоритмов обработки сигналов ММО, так и при экспериментальных измерениях и проверке точности моделирования каналов связи.

В данной работе для построения аналитической модели канала ММО предложено использовать аппроксимацию полной корреляционной матрицы канала суммой произведений Кронекера. Данная аппроксимация используется при моделировании корреляционных матриц сигналов датчиков в системах ЭЭГ и МЭГ, радаров с синтезированной апертурой.

В отличие от моделей Кронекера и Вайхсельбергера в данной модели полная корреляционная матрица аппроксимируется суммой произведений Кронекера матриц, представляющих не отдельные корреляционные матрицы на приемной и передающей стороне, а матриц, которые являются решениями задачи по методу наименьших квадратов.

Возможность использования оптимальной аппроксимации полной корреляционной матрицы через сумму произведений Кронекера при построении моделей канала ММО указана в работах [2, 3]. Но экспериментальное определение параметров моделей и подтверждение качества моделирования было проведено в незначительном числе работ [4]. Поэтому задача определения параметров модели по данным измерений канала и проверка точности моделирования радиоканала в различных условиях распространения являются актуальными.

Полная корреляционная матрица в виде аппроксимации представляется как сумма произведений Кронекера в виде

$$R_H = \sum_{n=1}^N T_n \otimes X_n$$

и определяется численными методами с учетом требования минимальной разности между исходной корреляционной матрицей канала и ее аппроксимацией:

$$C_{LS} = \left\| R_H - \sum_{n=1}^N T_n \otimes X_n \right\|^2.$$

Для решения задачи поиска аппроксимации корреляционной матрицы при заданной полной корреляционной матрице используется численный алгоритм Ван Лоана и Питсаниса [5]. Данный алгоритм определяет оптимальные оценки матриц X_n и T_n по методу наименьших квадратов с вычислением декомпозиции полной корреляционной матрицы по сингулярным числам (SVD).

Входящие в выражение суммы элементы матриц переставляются при помощи оператора перестановки $S: R^{IJ \times IJ} \rightarrow R^{I^2 \times J^2}$, что приводит к преобразованию выражения аппроксимации полной корреляционной матрицы к виду

$$S(R_H) = \sum_{n=1}^N \text{vec}(X_n) \otimes \text{vec}(T_n)^T$$

и находится минимум разности

$$C_{LS} = \left\| S(R_H) - \sum_{n=1}^N \text{vec}(X_n) \otimes \text{vec}(T_n)^T \right\|^2.$$

Выборочная корреляционная матрица после применения оператора перестановки записывается в виде

$$S(\hat{R}_H) = \sum_{n=1}^N H_n \otimes H_n.$$

Минимизация эквивалентна нахождению наилучшей аппроксимации матрицы $S(\hat{R}_H)$ матрицами рангом N , которая численно определяется через сингулярное разложение матрицы $S(\hat{R}_H)$, $S(\hat{R}_H) = U \Sigma V^T$, где $U \in R^{I^2 \times I^2}$, $V \in R^{J^2 \times J^2}$ – ортогональные матрицы, $\Sigma \in R^{I^2 \times J^2}$ – матрица сингулярных чисел. Аппроксимация матрицы $S(\hat{R}_H)$ матрицами рангом N , $N \leq \min(I, J)$, выражается в виде $S(\hat{R}_H) = \sum_{n=1}^N U_n \sigma_n V_n^T$, где U_n, V_n – столбцы с номером n в матрицах U, V .

Оценки матриц аппроксимации равны $\text{vec}(X_n) = U_n$, $\text{vec}(T_n) = \sigma_n V_n$.

После вычисления аппроксимации полной корреляционной матрицы модель канала ММО определяется в виде

$$H_{app} = \left(\sum_{n=1}^N T_n \otimes X_n \right)^{1/2} H_w.$$

Для исследования свойств моделей проводятся измерения радиоканалов ММО, результаты которых используются как исходные данные для построения, проверки и сравнения моделей.

2. Описание эксперимента

Измерения проводились в лабораторных условиях внутри помещения. Центральная частота излучаемого радиосигнала – 2.3 ГГц, ширина полосы частот сигнала – 100 МГц. Зондирующая последовательность Касами длительностью 16383 отсчета предварительно фильтровалась цифровым фильтром для получения спектра с меньшими внеполосными составляющими. Далее тестовая последовательность использовалась в векторном генераторе сигналов SMBV100A для формирования зондирующего радиосигнала с равномерным спектром. На приемной стороне сигнал обрабатывался анализатором спектра FSW26, позволяющим получать и записывать квадратурные отсчеты принятого сигнала.

Перед измерениями выполнена предварительная передача тестового сигнала от генератора на вход приемника без антенн, для последующей компенсации влияния входных цепей из результатов измерений. Записанный при этом сигнал являлся эталонным для взаимной корреляции при вычислении импульсных характеристик канала.

Выполнены измерения канала ММО в конфигурации четырех передающих и четырех приемных антенн. При измерениях антенны линейно передвигались с шагом $\frac{\lambda}{2}$, где λ – длина волны, см.

3. Результаты экспериментов

По полученным реализациям импульсных характеристик канала определены параметры моделей. Для модели Кронекера это корреляционные матрицы на передающей и приемной стороне, для модели Вайхсельбергера – матрицы собственных векторов на передающей и приемной стороне, по которым вычислена матрица связности. Для модели с аппроксимацией в виде суммы произведений Кронекера вычислялись оптимальные значения матриц T_n и X_n до величины пятого порядка.

Оценка полной корреляционной матрицы, отдельные корреляционные матрицы на передающей и приемной стороне были вычислены по множеству из 300 измеренных матриц канала H_n по выражениям:

$$\hat{R}_H = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \text{vec}(H_n) \text{vec}(H_n)^H,$$

$$\hat{R}_r = \frac{1}{NM_R} \sum_{n=1}^N (H_n^H H_n)^T,$$

$$\hat{R}_t = \frac{1}{NM_T} \sum_{n=1}^N H_n H_n^H.$$

Для модели Вайхсельбергера матрица связности была вычислена в виде

$$\tilde{\Omega} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (U_{RX}^H H_n U_{TX}^*) (U_{RX}^T H_n U_{TX}).$$

На основе вычисленных параметров моделей из результатов измерений выполнено получение реализаций матриц каналов по выражениям и методом имитационного моделирования Монте-Карло. Для построения и проверки характеристик моделей каналов необходимо определить критерии точности моделирования.

Наиболее широко в качестве критерия используется пропускная способность канала как самый важный показатель системы связи [4–6].

Хотя величина пропускной способности канала не отображает особенности пространственной структуры канала, она используется как показатель спектральной эффективности системы.

Эргодическая пропускная способность канала вычисляется усреднением по множеству величин мгновенной пропускной способности канала, определенным по соответствующим реализациям матриц канала узкополосной системы ММО:

$$\hat{C} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left\{ \log_2 \left[\det \left(I + \frac{\rho}{M_T} H_n H_n^H \right) \right] \right\}.$$

Аналитические корреляционные модели должны точно аппроксимировать полную корреляционную матрицу канала, отображающую пространственную структуру канала. Поэтому критерием качества модели является минимальная ошибка аппроксимации полной корреляционной матрицы, вычисленной на основе измеренных импульсных характеристик и синтезированной R_{mod} по реализациям модели.

Ошибка аппроксимации вычисляется как

$$\psi(\hat{R}_H, R_{\text{mod}}) = \frac{\|\hat{R}_H - R_{\text{mod}}\|_F}{\|R_{\text{mod}}\|_F},$$

где $\|\cdot\|_F$ – норма Фробениуса.

Вычисленная по выражению ошибка аппроксимации полной корреляционной матрицы для различных конфигураций антенн для различных моделей канала показана в таблице.

Ошибка аппроксимации полной корреляционной матрицы

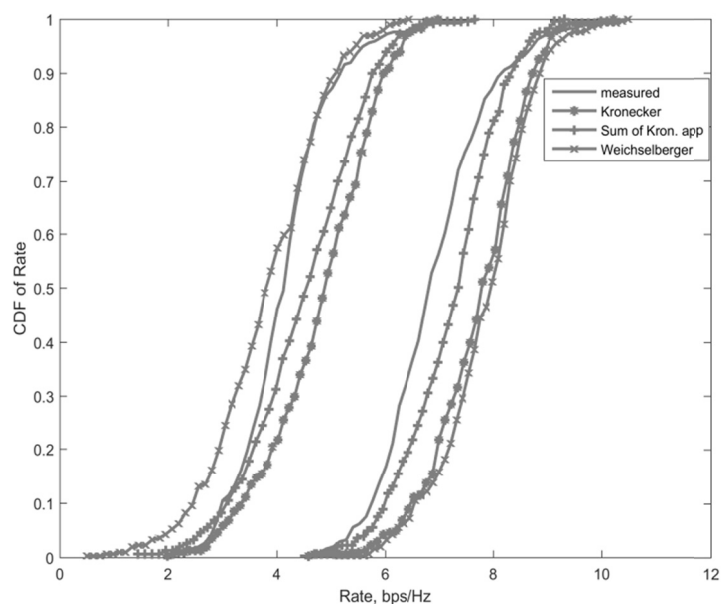
Модель	Конфигурации антенн					
	2×2			4×4		
Кронекера	0.032			0.075		
Вайхсельбергера	0.018			0.02		
Аналитическая с порядком аппроксимации n	$n = 1$	$n = 3$	$n = 5$	$n = 1$	$n = 3$	$n = 5$
	0.021	0.016	0.01	0.021	0.015	0.01

Модель Кронекера обладает большей ошибкой аппроксимации при увеличении количества антенн. Это можно объяснить тем, что для систем с большим количеством антенн и большим угловым разрешением отдельных лучей ошибка аппроксимации через произведение Кронекера увеличивается, так как угловые спектры на передающей и приемной стороне уже не являются независимыми. Модель Вайхсельбергера учитывает зависимость пространственной корреляции на приемной и передающей стороне и обеспечивает меньшую ошибку аппроксимации.

Аналитическая модель с аппроксимацией суммой произведений Кронекера имеет минимальную ошибку аппроксимации, так как ее параметры вычислялись

исходя из требования минимизации нормы Фробениуса. При этом точность аппроксимации при увеличении количества антенн сохраняется.

Также по выражению была вычислена оценка пропускной способности каналов двух типов моделей. На рисунке показана функция распределения эргодической пропускной способности канала ММО для двух типов конфигурации антенн. В левой части графика показано распределение пропускной способности измеренного канала и трех аналитических моделей для $M_T = M_R = 2$. В правой части показано распределение пропускной способности измеренного канала и трех аналитических моделей для $M_T = M_R = 4$.



Функция распределения эргодической пропускной способности канала ММО

Cumulative distribution function of ergodic channel capacity for channel measurement data and channel models

Модель с оптимальной аппроксимацией явно не разделяет пространственную корреляцию на передающей и приемной стороне и позволяет более точно аппроксимировать полную корреляционную матрицу.

Заключение

Модель Вайхсельбергера позволяет более точно аппроксимировать полную корреляционную матрицу и получить реализации канала с меньшим отклонением от измеренной пропускной способности, чем модель Кронекера. Это является подтверждением необходимости учета пространственной корреляции между передающей и приемной стороной при аналитическом моделировании каналов связи ММО.

Модель с оптимальной аппроксимацией явно не разделяет пространственную корреляцию на передающей и приемной стороне и позволяет более точно моделировать канал ММО по критерию минимума нормы Фробениуса разности матриц и по распределению эргодической пропускной способности. Дальнейшее

уточнение точности моделирования следует провести с учетом воспроизведения пространственной структуры канала, совместного углового спектра мощности.

Построенные модели канала ММО достаточно точно отображают свойства измеренного канала и могут использоваться при разработке и анализе различных алгоритмов обработки сигналов в системах связи ММО

ЛИТЕРАТУРА

1. Survey of channel and radio propagation models for wireless MIMO systems / P. Almers, E. Bonek, A. Burr, N. Czink, M. Debbah, V. Degli-Esposti, H. Hofstetter, P. Kyösti, D. Laurenson, G. Matz, A.F. Molisch, C. Oestges, H. Özcelik // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. – 2007. – Vol. 2007. – P. 019070.
2. A stochastic MIMO channel model with joint correlation of both link ends / W. Weichselberger, M. Herdin, H. Özcelik, E. Bonek // IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2006. – Vol. 5 (1). – P. 90–100.
3. **Costa N., Haykin S.** A novel wideband MIMO channel model and experimental validation // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2008. – Vol. 56. – P. 550–562.
4. **Han B., Zheng Y.** Higher rank principal Kronecker model for triply selective fading channels with experimental validation // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2015. – Vol. 64 (5). – P. 1654–1663.
5. **Loan C. van, Pitsianis N.** Approximation with Kronecker products // Linear Algebra for Large Scale and Real Time Applications. – Dordrecht, Netherlands: Kluwer, 1993. – P. 293–314.
6. **Aleksiejunas R.** MIMO channel reconstruction from lower dimensional multiple antenna measurements // Wireless Personal Communications. – 2017. – Vol. 96. – P. 543–562.

CONSTRUCTION OF ANALYTICAL WIRELESS MIMO CHANNEL MODEL BASED ON FULL CORRELATION MATRIX APPROXIMATION

Kalachicov A.A., Shelkunov N.S.

*Siberian State University of Telecommunications
and Information Sciences, Novosibirsk, Russia*

This paper addresses the experimental wireless MIMO channel modeling and validation based on channel sounding data using the approximation of the full channel correlation matrix. Measurement were carried out in indoor laboratory environment at central frequency 2.3 GHz. An analytical MIMO channel model is presented based on optimal approximation of channel covariance matrix. Approximation of a full channel covariance matrix is based on the optimal Kronecker product series expansion of the sample covariance matrix. The channel correlation matrices calculated from the measured channel coefficients were decomposed using Van Loan and Pitsanis approximation algorithm. Experimental validation of such model is presented. The accuracy of the MIMO channel modeling was evaluated by the correlation matrix distance and by calculating of CDF of channel capacity. The results show that these models have good agreement with the MIMO channel measured data. Also two popular analytical MIMO channel models – Kronecker and Weichselberger models are evaluated and compared with the presented channel model.

Keywords: MIMO channel sounder, channel parameter estimation, full channel correlation matrices, MIMO channel capacity, analytical MIMO channel model, optimal sum of Kronecker product approximation.

DOI: 10.17212/1727-2769-2020-3-52-61

REFERENCES

1. Almers P., Bonek E., Burr A., Czink N., Debbah M., Degli-Esposti V., Hofstetter H., Kyösti P., Laurenson D., Matz G., Molisch A.F., Oestges C., Özcelik H. Survey of channel and radio propagation models for wireless MIMO systems. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2007, vol. 2007, p. 019070.
2. Weichselberger W., Herdin M., Özcelik H., Bonek E. A stochastic MIMO channel model with joint correlation of both link ends. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2006, vol. 5 (1), pp. 90–100.
3. Costa N., Haykin S. A novel wideband MIMO channel model and experimental validation. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2008, vol. 56, pp. 550–562.
4. Han B., Zheng Y. Higher rank principal Kronecker model for triply selective fading channels with experimental validation. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2015, vol. 64 (5), pp. 1654–1663.
5. Loan C. van, Pitsianis N. Approximation with Kronecker products. *Linear Algebra for Large Scale and Real Time Applications*. Dordrecht, Netherlands, Kluwer, 1993, pp. 293–314.
6. Aleksiejunas R. MIMO channel reconstruction from lower dimensional multiple antenna measurements. *Wireless Personal Communications*, 2017, vol. 96, pp. 543–562.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Калачиков Александр Александрович – родился в 1977 году, канд. техн. наук, работает на кафедре радиотехнических систем Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики. Область научных интересов – обработка сигналов, измерение и оценка параметров радиоканалов. (Адрес: 630102, Россия, Новосибирск, Кирова, 86. E-mail diff32@rambler.ru).

Kalachikov Alexander Alexandrovich – is currently works at chair RTS, SibSUTIS. His current research interests include statistical signal processing, MIMO channel measurement, radio channel characterization and channel parameter estimation. (Address: 86, Kirova St., Novosibirsk, Russia. E-mail: diff32@rambler.ru).



Щелкунов Николай Сергеевич – аспирант кафедры радиотехнических систем Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики. Область научных интересов – измерение и оценка параметров радиоканалов. (Адрес: 630102, Россия, Новосибирск, Кирова, 86. E-mail shns@ngs.ru).

Shelkunov Nikolay Sergeevich – is currently working towards the Ph.D. degree on chair RTS SibSUTIS. His current research interests include radio channel characterization and modeling, RF measurement techniques. (Address: 86, Kirova St., Novosibirsk, Russia. E-mail: diff32@rambler.ru).

Статья поступила 11 мая 2020 г.
Received May 11, 2020

To references:

Kalachikov A.A., Shchelkunov N.S. Postroenie analiticheskoi modeli radiokanala MIMO na osnove approssimatsii polnoi korrelyatsionnoi matritsy [Construction of analytical wireless MIMO channel model based on full correlation matrix approximation]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2020, no. 3 (48), pp. 52–61. DOI: 10.17212/1727-2769-2020-3-52-61.

УДК 628.978; 628.938; 53.084.853

**МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ
ОСВЕТИТЕЛЬ****И.Г. Пальчикова^{1,2}, Е.В. Карамшук¹, Е.С. Смирнов¹,
Е.И. Пальчиков^{2,3}, М.С. Самойленко³**¹*Конструкторско-технологический институт научного
приборостроения СО РАН, 630058, г. Новосибирск*²*Новосибирский национальный исследовательский**государственный университет (НГУ) 630090, г. Новосибирск*³*Институт Гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090,
г. Новосибирск*

Обсуждаются особенности разработки многофункциональных полупроводниковых осветителей. Описаны конструкция и приведены характеристики экспериментального образца осветителя «Фотобокс 3138». Неравномерность освещенности на краях рабочего поля 300×300 мм не превышает 2 %. Конструкция включает белый светодиодный осветитель с цветовой температурой 5000 К (CIE D50) и высоким индексом цветопередачи (CRI 97+) и набор из шести независимо включаемых монохромных светодиодных осветителей в спектральном диапазоне от 365 до 880 нм. Цифровые изображения объектов, получаемые в «Фотобоксе 3138», пригодны для колориметрического, спектрального и мультиспектрального анализа.

Ключевые слова: светодиод, спектр излучения, белый свет, индекс цветопередачи, осветитель.

DOI: 10.17212/1727-2769-2020-3-62-74

Введение

Экспертные и аппаратные оценки цвета и цветовой разницы образцов широко применяются для определения состояния живописи [1, 2], для анализа состояния биологических объектов [3], контроля качества мясного сырья [4], для оперативного решения задач криминалистической экспертизы, выявления и характеристики следов выстрелов [5], дописок в документах [6], для измерения касательных напряжений поверхностного трения в аэродинамических установках с помощью тонкопленочных покрытий на основе холестерических жидких кристаллов [7] и для других специальных целей. Количественно цвет измеряется [8] тремя координатами в выбранном цветовом пространстве при источнике света с известной цветовой температурой (или спектром). Для решения каждой из перечисленных задач требуется осветительный прибор с заданными характеристиками, которые обычно не обеспечиваются стандартным фотооборудованием.

В частности, для технического обеспечения криминалистических исследований используются коммерческое осветительное оборудование и приборы для визуального осмотра объектов и выявления следов выстрелов в инфракрасном (ИК) и ультрафиолетовом (УФ) диапазонах спектра, такие как осветители «Свет-500», «ОЛД-41», более сложный электронно-оптический преобразователь «Рельеф-2» и др. В [9–11] задача выявления и анализа следов выстрелов решалась путем адаптации имеющегося оборудования. Однако эти приборы разработаны для

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ, грант № 19-08-00874а.

решения задач технико-криминалистической экспертизы документов и их технические характеристики не обеспечивают потребностей экспертных исследований следов выстрелов, в частности колориметрических расчетов получаемых цифровых изображений. Специальные аналитические приборы технического обеспечения производства специальных видов судебных экспертиз [12], как правило, стационарные, с большими габаритными размерами, причем при анализе свойств объектов преимущественно используются разрушающие методы исследования.

С учетом вышесказанного создание специального осветительного прибора для обеспечения фото- и колориметрических методов исследования плоских и близких к плоским объектов является актуальным. Цель настоящей работы – анализ особенностей разработки автономного портативного осветительного прибора, конструкция которого позволяет использовать его не только в лабораторных, но и в «полевых» условиях; а также позволяет фотографировать плоские и близкие к плоским объекты размером до 300×300 мм с заданным расстоянием до объекта. Его эксплуатационные характеристики освещенности должны оставаться неизменными в течение длительного срока. Для количественного сравнения свойств разных участков исследуемого объекта необходимо соблюдение однородной освещенности по всему полю съемки. Как правило, используются два вида фото-съемки. Для колориметрического анализа цифровых изображений необходим белый осветитель с высоким индексом цветопередачи. Для спектрального анализа – набор осветителей с узкими спектральными полосами, перекрывающими участки электромагнитного спектра от УФ до ИК диапазона.

1. Описание устройства. Спектральные характеристики источников света

Фундаментальные подходы получения белого света с высоким индексом цветопередачи предполагают применение калиброванных источников [13], таких как серная лампа, лампа накаливания, галогенная лампа, люминесцентная лампа с пятикомпонентным люминофором, металлогалогенная лампа, которые в рассматриваемом случае не подходят по ряду причин. Это – малый срок стабильной службы, длительный выход на рабочий режим, сложность калибровок яркости от включения к включению, непортативность исполнения, высокое энергопотребление.

Наиболее соответствующими поставленной задаче являются светодиодные источники. Анализ современного рынка светоизлучающих диодов выявил, что практически все белые светодиоды имеют глубокий провал в спектре излучения в области 480 нм, связанный с разницей спектров возбуждающего люминесценцию фиолетового светодиодного чипа на основе гетеропереходов InGaN/AlGaN и спектра излучения желтого люминофора на основе иттрий-алюминиевого граната YAG:Ce, нанесенного на чип. Если в спектре имеются провалы, то при колориметрическом анализе теряется информация о цвете объекта в участке, где присутствует провал. Именно по этой причине источники белого света на основе светодиодных систем из трех типов светодиодов RGB или стандартных белых светодиодов не обладают высоким индексом цветопередачи.

Поиски светодиодов с высоким качеством цветопередачи привели к новым SMD-светодиодам, разработанным японской компанией Toshiba Materials Co., Ltd. [14] по технологии под названием Tri-R и корейской компанией Seoul Semiconductor (SAWS0661A и STW9C2PB-S) [15]. В этих светодиодах кристалл покрывается трехкомпонентным люминофором, спектр которого смещен в коротковолновую область. Для них заявлены [14, 15] высокая равномерность спектра и

экстремально высокий индекс цветопередачи CRI: 97+. Разработанный прибор «Фотобокс 3138» строился на первых коммерческих образцах этих светодиодов двух типов: STW9C2PB-S с габаритами 3×3×0.65 мм мощностью до 0.2 Вт и SAWS0661A, с размерами основания 13.5×13.5 мм и мощностью до 6 Вт. Оба с цветовой температурой 5000 К.

На рис. 1 приведены спектры «теплого» и «холодного» белого света типичных источников. Спектр SMD-светодиода STW9C2PB-S показан на рис. 1 сплошной линией. Видно, что провал его спектральной кривой на 480 нм не превышает 30 % от максимума. Такая спектральная характеристика позволяет производить визуальные и точные количественные колориметрические измерения малых цветовых отличий.

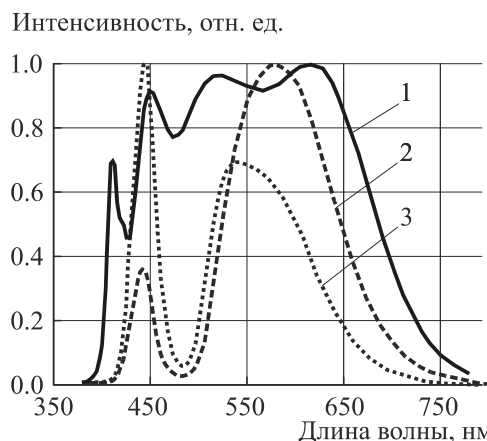


Рис. 1 – Спектры белого света, полученные экспериментально с помощью спектрометра «Колibri-2» (ООО «ВМК-Оптоэлектроника», Россия, Новосибирск):

линия 1 – спектр излучения SMD-светодиода STW9C2PB-S; линия 2 – спектр «теплого» белого света светодиодной осветительной панели LMPRS.Office Slim 15 315 LED lamp (Lampiris plant, Russia); линия 3 – спектр «холодного» белого света (Cree® J Series® 3030 LED)

Fig. 1 – White light spectra obtained experimentally using the “Kolibri-2” spectrometer (VMK-Optoelectronics LLC, Russia, Novosibirsk):

line 1 – the emission spectrum of STW9C2PB-S SMD LED; line 2 – spectrum of the “warm” white light of the LED lighting panel LMPRS.Office Slim 15 315 LED lamp (Lampiris plant, Russia); line 3 – spectrum of the “cold” white light (Cree® J Series® 3030 LED)

Для спектральных съемок в диапазоне от 365 до 880 нм выбраны шесть типов светодиодов, спектральные характеристики которых даны на рис. 2. В видимом диапазоне пики излучения приходятся на длины волн 458.1 нм, 523.1 нм, 594.1 нм, 630.6 нм (синий, зеленый, желтый, красный). Кроме осветителей видимого света, добавлен осветитель ближнего ультрафиолета с пиком излучения на длине волны 370 нм и инфракрасный – на 850 нм. Спектральные полосы светодиодов – узкие и практически не пересекаются. Это позволяет уверенно разделять

спектральные диапазоны при регистрации цифровых снимков. В случае ультрафиолетового осветителя можно проводить либо фотосъемку в УФ диапазоне, либо люминесцентную фотосъемку, используя соответствующий светофильтр перед объективом камеры.

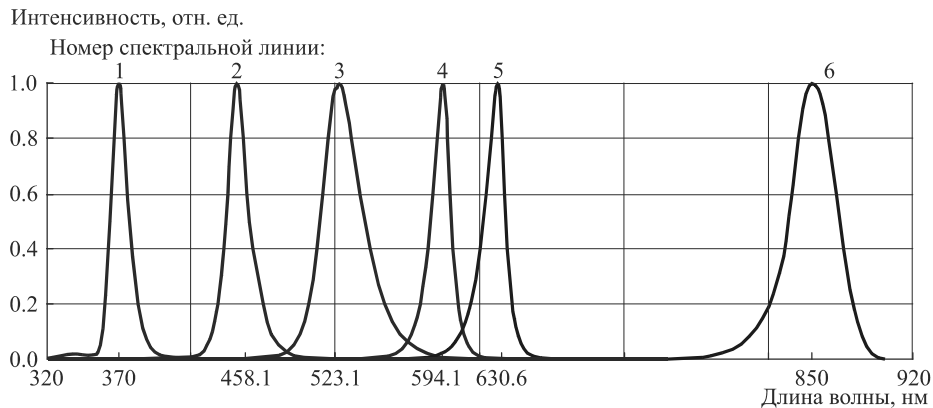


Рис. 2 – Спектральные характеристики светодиодов монохромных осветителей:

линия 1 – спектр осветителя УФ диапазона (светодиоды SST-10-UV-A130-E365); линия 2 – спектр синего осветителя (светодиоды XPEBRY-L1-0000-00K02); линия 3 – спектр зеленого осветителя (светодиоды XPEBGR-L1-0000-00C03); линия 4 – спектр желтого осветителя (светодиоды XPEBAM-L1-0000-00802CT); линия 5 – спектр красного осветителя (светодиоды XPEBRD-L1-0000-00502CT); линия 6 – спектр осветителя ИК диапазона (светодиоды SST-10-IR-B130-K850)

Fig. 2 – Spectral characteristics of monochrome LEDs:

line 1 – spectrum of the UV illuminator (LEDs SST-10-UV-A130-E365); line 2 – spectrum of the blue illuminator (LEDs XPEBRY L1 0000 00K02); line 3 – spectrum of the green illuminator (LEDs XPEBGR L1 0000 00C03); line 4 – spectrum of the yellow illuminator (XPEBAM-L1-0000-00802CT LEDs); line 5 – spectrum of the red illuminator (XPEBRD-L1-0000-00502CT LEDs); line 6 – spectrum of the IR illuminator (SST-10-IR-B130 LEDs-K850)

2. Описание устройства. Распределение освещенности по рабочему полю

Как для белого, так и для спектрально-зонального осветителя необходимо получать однородную повторяемую диффузную засветку рабочего поля таким образом, чтобы в сквозном канале регистрации данных «рабочее поле – объектив – фото-матрица – цифровое изображение» не требовалось дополнительных преобразований по коррекции поля освещенности. Поэтому решалась задача оптимального расположения осветителей внутри рабочей камеры.

Выбор расположения осветителей, обеспечивающего равномерное освещение рабочего поля, провели численным моделированием с помощью пакета САПР МАТНСАД. На рис. 3, а показан ход лучей от двух точечных источников с силой света I_0 в расчетной одномерной задаче. Расчет освещенности в каждой точке рабочего поля выполнялся путем суммирования освещенностей от точечных источников, расположенных на ленточном осветителе, как показано на рис. 3, б. Из геометрического рассмотрения хода лучей очевидно, что для достижения оптимальной равномерности освещения рабочего поля осветители нужно удалять от объекта съемки, приближая наклонные лучи к оси поля зрения объектива, расположенного выше осветителя. С другой стороны, для удаления возможных бликов от объекта съемки на периферию снимка осветитель нужно по возможности приближать к объекту съемки и вводить вбок.

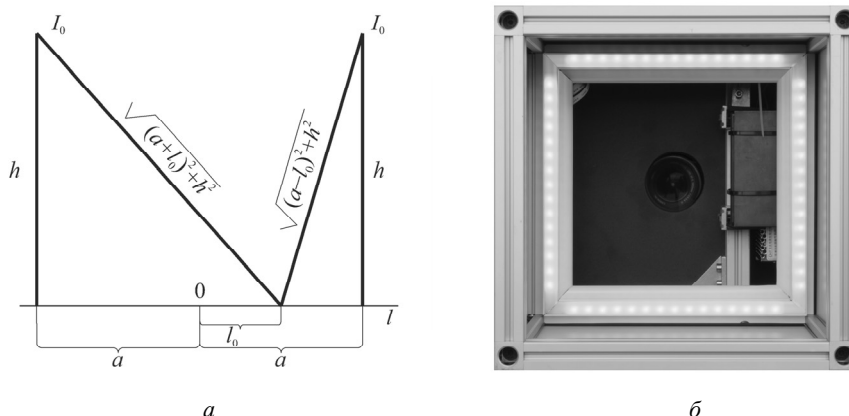


Рис. 3 – Расчет освещенности:

a – начальные условия для расчета освещенности: координатная ось *l* проходит через середину *O* рабочего поля, высота отстояния осветителя от рабочего поля – *h*, ширина рабочего поля – $2a$, сила света источника – I_0 ; *б* – вид на рамки осветителя со стороны объекта съемки (рабочего поля)

Fig. 3 – Calculation of a brightness:

a – Initial conditions for calculating the brightness: the coordinate axis *l* passes through the middle *O* of the working field, the height of the distance between the illuminator and the working field is *h*, the width of the working field is $2a$, the light intensity of the source is I_0 ; *b* – View of the frame of the illuminator from the side of the shooting object (working field)

В результате численного моделирования и экспериментальных проверок выбрана схема, в которой одиночный ленточный осветитель, состоящий из набора светодиодов, размещался на оптимальной высоте по периметру на боковых стенках камеры, как показано на рис. 3, б. При размере световой камеры $300 \times 300 \times 300$ мм и отстояния ленты осветителя от рабочего поля от 160 до 260 мм расчетная неравномерность освещенности на краях поля не превышает 2 %.

3. Описание устройства. Конструктивные решения

Фотография прибора «Фотобокс 3138» приведена на рис. 4. Корпус устройства построен на основе профиля Alumica 30×30 мм (ООО «СтройСнабКомплект», Тверь, Россия) и алюминиевых плоских панелей, вставленных в пазы профиля через уплотнитель [16, 17]. Конструкция имеет внутренний объем с основанием 302×302 мм, высотой 394 мм и надстройку высотой 124 мм и шириной 115 мм для крепления фотокамеры и размещения электронных схем.

60 SMD светодиодов марки STW9C2PB-S с цветовой температурой 5000 К (CIE D50) и CRI = 97+ смонтированы на специализированную ленту из полиимида длиной 1 м группами по 3 штуки последовательно с балластным резистором 120 Ом. Это обеспечивает ток светодиода около 30 мА и мощность примерно 100 мВт на каждый (6 Вт суммарно). Четыре отрезка ленты по 25 см вклеены в рамку специализированного алюминиевого профиля, служащего теплоотводом и закрыты матовым светорассеивающим нелюминесцирующим экраном из лавсановой пленки. Аналогично смонтированы рамки монохромных осветителей.

Рамки со светодиодными осветителями крепятся на высоте 250 мм от основания к стенкам по периметру. Выше светодиодов, внутри надстройки крепятся аккумулятор, блок питания, плата драйверов, плата заряда аккумулятора. На передней панели смонтирована панель переключателей осветителей с платой индикатора.

Ниже передней панели крепится откидная дверка, через которую происходит закладка объекта исследования. Дверки по периметру оклеены уплотняющим профилем для исключения паразитных засветок. На надстройке смонтирован угловой соединитель, к которому крепится штативный адаптер Base75 [18] фотокамеры.



Рис. 4 – Общий вид прибора «Фотобокс 3138». Одна из стенок рабочей камеры сделана откидной – для простоты работы с объектом фотосъемки. Сверху расположен блок крепления фотокамеры. По бокам корпуса расположены рукоятки для переноски и для позиционирования камеры при измерениях. На экране монитора – изображение тестовой пластины

Fig. 4 – Overview of the device "Photobox 3138". One of the walls of the working chamber is made of folding – for simplicity of the work with the object. Above is the camera attachment block. On the sides of the body there are folding handles for carrying and for positioning the camera during measurements. On the monitor screen – the image of the test plate

Применение семи разных типов осветителей потребовало создания автономного источника с семью независимыми, отдельно калибрующимися, стабильными источниками тока. Калибровки делаются однократно, регуляторами «под шлиц» внутри блока. Каждый из семи осветителей имеет свой независимый тумблер включения-выключения. Таким образом, можно выбирать самые разные схемы освещения. Встроенный аккумулятор позволяет работать автономно в течение 10 часов. Кроме того, прибор содержит сетевой блок питания и встроенный контроллер зарядки аккумулятора, что обеспечивает его многофункциональность.

Для совмещения центра поля зрения камеры с центром поля освещения применяется тестовая алюминиевая пластина, на которую помещается объект. Со стороны объекта на пластину нанесен рисунок мишени в виде концентрических окружностей диаметрами 50, 70.7, 100 мм и вписанных в них квадратов (рис. 4).

Внутренние стенки камеры могут быть черными, что реализует тип освещенности МКО «45/0», либо – белыми для типа освещенности МКО «дифф./0».

4. Рабочие характеристики

Для апробации и экспериментальной проверки характеристик изготовленного прибора «Фотобокс 3138» использовались малогабаритный многоканальный волоконный спектрометр «Колибри-2» (ООО «ВМК-Оптоэлектроника», Россия, Новосибирск) и камера Canon EOS 500D (Canon Inc., Japan) с объективом, обработка изображений выполнялась специализированным колориметрическим программным обеспечением ColorVideoTool [19] и Microsoft Excel.

Спектры светодиодов, показанные на рис. 1 и рис. 2, измерены в лаборатории с помощью спектрометра «Колибри-2» и практически не отличаются от заявленных изготовителями.

Однородность освещенности рабочего поля оценивалась по цифровым снимкам образца белого объекта, сделанных на линейном участке передаточной характеристики камеры [20], где яркость в каждом пикселе изображения пропорциональна освещенности. На рис. 5 приведены полиномиальные линии тренда экспериментальных данных для различного отстояния h белого осветителя от рабочего поля. Достоверность аппроксимации составила 0.97. Среднее значение СКО для $h = 160$ мм составляет 0.03 %, для $h = 210$ мм – 0.04 %, для $h = 260$ мм – 0.05 %. Увеличение h на 50 мм приводит к увеличению СКО на 0.01 %. В градациях яркости это соответствует 6...7 квантам младшего разряда 16-разрядного АЦП фотокамеры, т. е. находится на уровне шумов фотоматрицы.

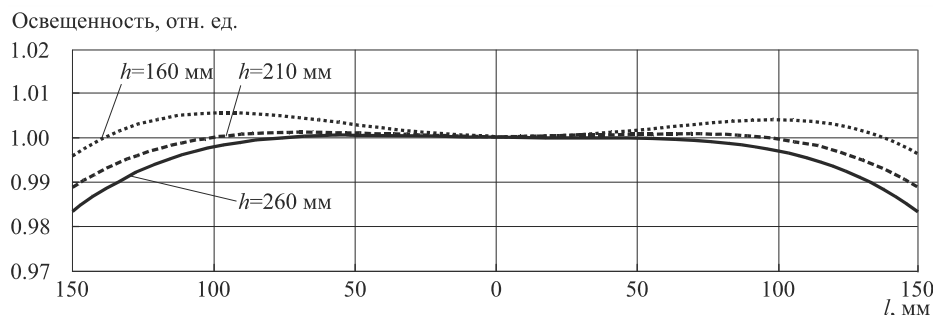


Рис. 5 – Экспериментально полученные графики распределения освещенности, нормированной на значение в центре рабочего поля вдоль оси l , проходящей через середину рабочего поля осветительной камеры для различного отстояния h осветителя от рабочего поля

Fig. 5 – Experimentally obtained graphs of the illumination distribution normalized to the value in the center of the working field along the l -axis passing through the middle of the working field of the lighting chamber for different distances h of the illuminator from the working field

По цифровым снимкам образца белого рассчитывались также цветовые координаты [8] осветителей. Расположение осветителей на диаграмме цветности CIE1931 xu показано на рис. 6 треугольными маркерами. Маркеры цветовых координат, полученные при использовании нескольких осветителей, помечены номерами соответствующих осветителей через дефис. Доминирующие длины волн нанесены на локус круглыми маркерами, значения подписаны курсивом. Положение точки равноэнергетического источника обозначено литерой E . Квадратным маркером обозначена точка, лежащая на локусе Планка и наиболее близкая к точке E , она подписана значением температуры абсолютно черного тела в градусах Кельвина.

Осветительный прибор «Фотобокс 3138» имеет повторяемые в течение длительного срока эксплуатации характеристики освещенности, мгновенный выход на рабочий режим и следующие конструктивные характеристики: внешние габариты 446×362×630.5 мм; вес с фотокамерой не более 16.5 кг; рабочее поле 300×300 мм; падение освещенности на краях рабочего поля – в пределах 2 %.

Перечисленные характеристики позволяют использовать устройство для получения цифровых фотографий объектов, пригодных для колориметрического, спектрального и мультиспектрального анализа.

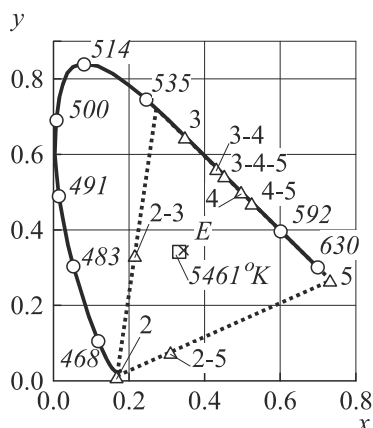


Рис. 6 – Расположение монохромных осветителей на диаграмме цветности CIE1931 xy:

маркер 2 обозначает источник синего света; маркер 3 – источник зеленого света; маркер 4 – источник желтого света; маркер 5 – источник красного света. Нумерация маркеров соответствует нумерации спектральных линий на рис. 2. По осям указаны значения безразмерных координат на плоскости xy

Fig. 6 – Location of monochrome illuminators on the CIE1931 xy chromaticity diagram:

marker 2 indicates the blue light source; marker 3 – the green light source; marker 4 – the yellow light source; marker 5 – the red light source. The numbering of markers corresponds to the numbering of the spectral lines in Fig. 2. The axes indicate the values of the coordinates at the xy plane

Экспериментальный образец осветительного прибора «Фотобокс 3138» был успешно апробирован [21] в ФГКОУ ВО «Волгоградская академия Министерства внутренних дел Российской Федерации» при проведении колориметрического и мультиспектрального анализа фотографий мишеней и определения количественной цветовой разницы штрихов надписей на документах, выполненных различными красящими веществами, а также надписей, залитых краской.

Заключение

Показана возможность создания автономного портативного спектрального осветительного прибора с функцией белого света с высоким индексом цветопередачи на основе полупроводниковых светодиодов. Разработан экспериментальный образец осветительного прибора «Фотобокс 3138», который имеет мобильную конструкцию, что допускает его работу не только в лабораторных, но и «полевых» условиях. Прибор имеет осветительную камеру с рабочим полем 300 × 300 мм и площадкой для крепления цифровой фотокамеры с блендой.

Для колориметрического анализа цифровых изображений в приборе «Фотобокс 3138» создан белый осветитель с цветовой температурой 5000 K (CIE D50) и высоким индексом цветопередачи (CRI 97+).

Для спектрального и мультиспектрального анализа цифровых изображений в приборе «Фотобокс 3138» создан набор из шести независимо включаемых осветителей с узкими спектральными полосами в спектральном диапазоне от 365 до 880 нм (от УФ до ИК диапазона излучения).

Осветители дают равномерную освещенность без посторонних паразитных засветок на рабочем поле в различных спектральных диапазонах (падение освещенности на краях рабочего поля – менее 2 %).

Проведена успешная апробация «Фотобокса 3138» в ФГКОУ ВО «Волгоградская академия Министерства внутренних дел Российской Федерации».

Разработанный осветительный прибор «Фотобокс 3138» может быть рекомендован к использованию в многопрофильных лабораториях для получения цифровых снимков объектов, пригодных для колориметрического анализа в белом свете, а также в монохроматическом или мультиспектральном режиме.

ЛИТЕРАТУРА

1. Изменения цветности неорганических пигментов традиционной китайской живописи под воздействием узких спектральных линий четырех хроматических компонент светодиодов белого цвета / R. Dang, N. Wang, H. Tan, J. Wu // *Оптический журнал*. – 2019. – Т. 86, вып. 5. – С. 61–69.
2. **Martinez K., Cupitt J., Saunders D.** High resolution colorimetric imaging of paintings // *Proceedings SPIE*. – 1993. – Vol. 1901: Cameras, scanners, and image acquisition system / ed. by H.C. Marz, R.L. Nielsen. – P. 25–36.
3. **Шмидт В.** Оптическая спектроскопия для химиков и биологов. – М.: Техносфера, 2007. – 368 с.
4. **Алейников А.Ф., Пальчикова И.Г., Смирнов Е.С.** Оценка качества мяса птицы по анализу его цветовых характеристик // *Вычислительные технологии*. – 2016. – Т. 21, спец. вып. 1. – С. 27–40.
5. Использование колориметрического метода для выявления следов выстрела в условиях их маскирования цветом поверхности объекта / И.В. Латышов, И.Г. Пальчикова, А.В. Кондаков, В.А. Васильев, Е.С. Смирнов // *Судебная экспертиза*. – 2018. – № 3 (55). – С. 25–35. – DOI: 10.25724/VAMVD.BPST.
6. **Барина О.А., Пальчикова И.Г.** Возможность цветового анализа красящих веществ при производстве технико-криминалистической экспертизы документов // *Судебная экспертиза*. – 2017. – № 4 (52). – С. 75–82.
7. Панорамная диагностика касательных напряжений на стенке канала с выступом с помощью жидких кристаллов / Г.М. Жаркова, В.Н. Коврижина, А.П. Петров, С.П. Подъячев // *Теплофизика и аэромеханика*. – 2016. – Т. 23, № 6. – С. 865–873.
8. **Judd D.B., Wyszecki G.W.** Color in business, science, and industry. – New York: John Wiley & Sons, 2003. – 576 p.
9. **Латышов И.В., Козлов М.О.** Применение сканеров при производстве судебно-баллистических экспертиз и исследований // *Судебная экспертиза*. – 2008. – № 1 (13). – С. 41–48.
10. Возможности исследования следов выстрела на преградах с использованием программы Adobe Photoshop / И.В. Латышов, М.О. Козлов, Е.В. Китаев, В.И. Фокин, В.Б. Барканов // *Вестник Волгоградской академии МВД России*. – 2009. – № 3 (10). – С. 151–158.
11. Возможность использования аппаратных ресурсов видеоспектрального компаратора «Docucenter Nirvis Projectina» при производстве судебно-баллистических исследований следов выстрела / И.В. Латышов, А.В. Кондаков, В.А. Васильев, М.Е. Пахомов // *Судебная экспертиза: российский и международный опыт: сборник научных трудов II международной научно-практической конференции, Волгоград, 21–22 мая 2014 г.* – Волгоград: ВА МВД России, 2014. – С. 181–185.
12. Актуальные проблемы разработки современных технических средств для криминалистического исследования следов выстрела / И.В. Латышов, И.Г. Пальчикова, А.В. Кондаков, В.А. Васильев, Е.С. Смирнов // *Судебная экспертиза*. – 2017. – № 4 (52). – С. 55–63.
13. ГОСТ 7721–89. Источники света для измерений цвета. Типы. Технические требования. Маркировка. – М.: Изд-во стандартов, 1989.
14. Toshiba Materials Co., Ltd. TRI-R Technology. – URL: <https://www.toshiba-tmat.co.jp/en/tri-r/technology/> (accessed: 23.12.2020).
15. Seoul Semiconductor. SunLike STW9C2PB-S. Specification. Documentation. – URL: http://www.seoulsemicon.com/en/product/spec/_91_SunLike_92_%20STW9C2PB-S/31 (accessed: 23.12.2020).
16. **Карамшук Е.В.** Разработка конструкции фотобокса для криминалистического исследования следов выстрелов // *Интерэкспо ГЕО-Сибирь: XV международный научный*

- конгресс, 24–26 апреля 2019 г., Новосибирск: сборник материалов: в 9 т. – Новосибирск : СГУГиТ, 2019. – Т. 8: Национальная конференция с международным участием «СибОптика-2019». – С. 286–291. – DOI: 2618-981X-2019-8-286-291.
17. Интерэкспо ГЕО-Сибирь–2014: X международный научный конгресс, 08–18 апреля 2014 г., Новосибирск; Международная научная конференция «СибОптика-2014»: сборник материалов. – Новосибирск: СГГА, 2014. – Т. 5, № 1. – С. 128–134.
 18. Alumica™. Алюминиевый конструкционный станочный профиль: web-сайт. – URL: <http://alumica.ru/about> (дата обращения: 23.12.2020).
 19. Адаптер штативный Base 75 с быстростъемной площадкой. – URL: <https://gbvideo.ru/catalog/shtativnyye-adaptery/adapter-shtativnyy-base-75-s-bystrosemnoy-ploshchadkoy/> (дата обращения: 23.12.2020).
 20. Компьютерная программа «Анализ цвета поверхности образцов биологической ткани ColourVideoTool»: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2014615176 / Алейников А.Ф., Пальчикова И.Г., Чугуй Ю.В., Воробьев В.В., Макашев Ю.Д., Ярушин Т.В. – Зарег. 20.05.2014.
 21. Цветовой анализ цифровых изображений при производстве экспертных исследований следов выстрела / И.Г. Пальчикова, И.В. Латышов, А.В. Кондаков, В.А. Васильев, Е.С. Смирнов // Доклады АН ВШ РФ. – 2015. – № 2 (27). – С. 88–101. – DOI: 10.17212/1727-2769-2015-2-88-101.
 22. О количественной оценке малых цветовых различий на цифровых изображениях / И.Г. Пальчикова, Е.С. Смирнов, О.А. Барина, И.В. Латышов, В.А. Васильев, А.В. Кондаков // Компьютерная оптика. – 2020. – Т. 44, № 4. – С. 606–617. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-631.

MULTI-FUNCTIONAL SEMICONDUCTOR LIGHTING

**Palchikova I. G., Karamshuk E. V., Smirnov E. S.,
Palchikov E. I., Samoilenko M. S.**

¹*Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering SB RAS,
Novosibirsk, Russia*

²*Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia
Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS, Novosibirsk, Russia
e-mail: Palchikova@gmail.com*

Features of the development of the multifunctional semiconductor illuminators are discussed. The design and characteristics of the experimental model of the “Photobox 3138” illuminator are described. The lighting variation does not exceed 2 % at the edges of the working field of 300*300 mm. The design includes a white LED illuminator with a color temperature of 5000 K (CIE D50) and a high color rendering index (CRI 97+) and a set of six independently switched monochrome led illuminators in the spectral range from 365 to 880 nm. Digital images of objects obtained in “Photobox 3138” are of use to colorimetric, spectrozonal, and multispectral analysis.

Keywords: LED, emission spectrum, white light, color rendering index, lighting.

DOI: 10.17212/1727-2769-2020-3-62-74

REFERENCES

1. Dang R., Wang N., Tan H., Wu J. Chromaticity changes of inorganic pigments in traditional Chinese paintings due to narrowband spectra in four-primary white light-emitting-diodes. *Opticheskii zhurnal = Journal of Optical Technology*, 2019, vol. 86, iss. 5, pp. 61– 69. (In Russian).
2. Martinez K., Cupitt J., Saunders D. High resolution colorimetric imaging of paintings. *Proceedings SPIE*, 1993, vol. 1901. *Cameras, scanners, and image acquisition system*. Ed. by H.C. Marz, R.L. Nielsen, pp. 25–36.

3. Schmidt W. *Optical spectroscopy in chemistry and life sciences*. Weinheim, Wiley-VCH, 2005 (Russ. ed.: Shmidt V. *Opticheskaya spektroskopiya dlya khimikov i biologov*. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2007. 368 p.).
4. Aleynikov A.F., Palchikova I.G., Smirnov E.S. Otsenka kachestva myasa ptitsy po analizu ego tsvetovyykh kharakteristik [Evaluation of the poultry meat quality by analyzing its color characteristics]. *Vychislitel'nye tekhnologii = Computational Technologies*, 2016, vol. 21, iss. 1, pp. 27–40.
5. Latyshov I.V., Palchikova I.G., Kondakov A.V., Vasilev V.A., Smirnov E.S. Ispol'zovanie kolorimetriceskogo metoda dlya vyyavleniya sledov vystrela v usloviyakh ikh maskirovaniya tsvetom poverkhnosti ob'ekta [Application of colour method to identify fire shot traces, camouflaged by the colour of an object surface]. *Sudebnaya ekspertiza = Forensic Examination*, 2018, no. 3 (55), pp. 25–35. DOI: 10.25724/VAMVD.BPST.
6. Barinova O.A., Palchikova I.G. Vozmozhnost' tsvetovogo analiza krasnyashchikh veshchestv pri proizvodstve tekhniko-kriminalisticheskoi ekspertizy dokumentov [Discrimination analysis of pigments in the technical criminalistics examination of documents]. *Sudebnaya ekspertiza = Forensic Examination*, 2017, no. 4 (52), pp. 75–82.
7. Zharkova G.M., Kovrizhina V.N., Petrov A.P., Pod'yachev S.P. Panoramnaya diagnostika kasatel'nykh napryazhenii na stenke kanala s vystupom s pomoshch'yu zhidkikh kristallov [Panoramic diagnostics of tangential stresses on the channel wall with a protrusion using liquid crystals]. *Teplofizika i aeromekhanika = Thermophysics and Aeromechanics*, 2016, vol. 23, no. 6, pp. 865–873. (In Russian).
8. Judd D.B., Wyszecki G.W. *Color in business, science, and industry*. New York, John Wiley & Sons, 2003. 576 p.
9. Latyshov I.V., Kozlov M.O. Primenenie skanerov pri proizvodstve sudebno-ballisticheskikh ekspertiz i issledovaniy [The use of scanners in the production of forensic ballistics examinations and research]. *Sudebnaya ekspertiza = Forensic Examination*, 2008, no. 1 (13), pp. 41–48.
10. Latyshov I.V., Kozlov M.O., Kitaev E.V., Fokin V.I., Barkanov V.B. Vozmozhnosti issledovaniya sledov vystrela na pregradakh s ispol'zovaniem programmy Adobe Photoshop [Possibilities of gunshot traces examination on barriers with the help of Adobe Photoshop]. *Vestnik Volgogradskoi akademii MVD Rossii = Volgograd Academy of the Russian Internal Affairs Ministry's Digest*, 2009, no. 3 (10), pp. 151–158.
11. Latyshov I.V., Kondakov A.V., Vasilev V.A., Pakhomov M.E. [Applicability video spectrometer hardware «Docucenter Nirvis Projectina» in the production forensic ballistic studies of shot's tracks]. *Sudebnaya ekspertiza: rossiiskii i mezhdunarodnyi opyt: sbornik nauchnykh trudov 2 mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Forensic examination: Russian and International experience: proceedings of the 2nd International Scientific-Practical Conference], Volgograd, May 21–22, 2014, pp. 181–185. (In Russian).
12. Latyshov I.V., Palchikova I.G., Kondakov A.V., Vasilev V.A., Smirnov E.S. Aktual'nye problemy razrabotki sovremennykh tekhnicheskikh sredstv dlya kriminalisticheskogo issledovaniya sledov vystrela [Actual problems of development of modern technical means for forensic investigation of shot traces]. *Sudebnaya ekspertiza = Forensic Examination*, 2017, no. 4 (52), pp. 55–63.
13. GOST 7721–89. *Istochniki sveta dlya izmerenii tsveta. Tipy. Tekhnicheskie trebovaniya. Markirovka* [State Standard 7721–89. Illuminants for colour measurements. Types. Technical requirements. Marking]. Moscow, Standards Publ., 1989.
14. *Toshiba Materials Co., Ltd. TRI-R Technology*. Available at: <https://www.toshibatmat.co.jp/en/tri-r/technology/> (accessed 23.12.2020).
15. *Seoul Semiconductor. SunLike STW9C2PB-S. Specification. Documentation*. Available at: http://www.seoulsemicon.com/en/product/spec/_91_SunLike_92_%20STW9C2PB-S/31 (accessed 23.12.2020).
16. Karamshuk E.V. [Development of photobox design for the criminalistics research of the shot tracks]. *Interexpo GEO-Sibir': XV mezhdunarodnyi nauchnyi congress*. T. 8. *Natsional'naya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem "SibOptika-2019"* [Interexpo GEO-Siberia–2014: XV International Scientific Congress. Vol. 8. International Science Conference "Siberian Optics-2019"], Novosibirsk, 24–26 of April, 2019, pp. 286–291. DOI: 2618-981X-2019-8-286-291. (In Russian).

17. Alumica™. *Aluminiumy konstruktivnyy stanochnyy profil* [Alumica™. Aluminum structural machine profile]: website. Available at: <http://alumica.ru/about> (accessed 23.12.2020).
18. *Adapter shtativnyi Base 75 s bystros"emnoi ploshchadkoi* [Tripod adapter Base 75]. Available at: <https://gbvideo.ru/catalog/shtativnye-adaptery/adapter-shtativnyy-base-75-s-bystrosemnoy-ploshchadkoy/> (accessed 23.12.2020).
19. Aleinikov A.F., Palchikova I.G., Chugui Yu.V., Vorob'ev V.V., Makashev Yu.D., Yarushin T.V. *Komp'yuternaya programma "Analiz tsveta poverkhnosti obraztsov biologicheskoi tkani ColourVideoTool"* [The computer program "Analysis of the color sample surface of biological tissue ColourVideoTool"]. The Certificate on official registration of the computer program. No. 2014615176, 2014. (In Russian, unpublished).
20. Palchikova I.G., Latyshov I.V., Vasilev V.A., Kondakov A.V., Smirnov E.S. Tsvetovoi analiz tsifrovyykh izobrazhenii pri proizvodstve ekspertnykh issledovaniy sledov vystrela [Color analysis of digital images in expert judgement of shot's trace]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2015, no. 2 (27), pp. 88–101. DOI: 10.17212/1727-2769-2015-2-88-101.
21. Palchikova I.G., Smirnov E.S., Barinova O.A., Latyshov I.V., Vasiliev V.A., Kondakov A.V. O kolichestvennoi otsenke malyykh tsvetovykh razlichii na tsifrovyykh izobrazheniyakh [About quantifying small color differences in digital images]. *Komp'yuternaya optika = Computer Optics*, 2020, vol. 44, no. 4), pp. 606–617. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-631.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Пальчикова Ирина Георгиевна – родилась в 1954 г, окончила Новосибирский государственный университет в 1976 г. по специальностям «Физика» и «Прикладная математика». Доктор технических наук, доцент, профессор НГУ, заведующая лабораторией 1-3 в ФГБУН Конструкторско-технологическом институте научного приборостроения СО РАН и профессор кафедры «Общая физика» НГУ. Область научных интересов: лазерные информационные технологии, компьютерная оптика, компьютерное зрение. (Адрес: 630058, Россия, Новосибирск, ул. Русская, 41. E-mail: palchikova@gmail.com).

Palchikova Irina Georgievna (b. 1954) – graduated from the Novosibirsk State University in 1976, majoring in Physics and Applied Mathematics. She received her Doctor in Technical Science degree. Associated professor. Head of Laser Precision Technologies Laboratory of Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering SB RAS, professor at NSU's General Physics sub department. Her leading research interests include laser information technologies, computer optics, computer vision. (Address: 41, Russkaya St., Novosibirsk, 630058, Russia. E-mail: palchikova@gmail.com).



Карамшук Елена Викторовна – родилась в 1964 г, окончила Новосибирский институт инженеров геодезии и картографии в 1988 г. по специальности «Оптическое приборостроение». Конструктор 1 категории в ФГБУН Конструкторско-технологическом институте научного приборостроения СО РАН. Область научных интересов: оптика, оптическое приборостроение. (Адрес: 630058, Россия, Новосибирск, ул. Русская, 41. E-mail: Elka-kti@yandex.ru).

Karamshuk Elena Victorovna (b. 1964) – graduated from the Novosibirsk Institute of Geodesy and Cartography Engineers in 1988 with a degree in Optical Instrumentation. Designer of Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering SB RAS. Her research interests are currently focused on optical instrumentation. (Address: 41, Russkaya St., Novosibirsk, 630058, Russia. E-mail: Elka-kti@yandex.ru).



Смирнов Евгений Сергеевич – родился в 1985 г., окончил Сибирскую государственную геодезическую академию по специальности «Оптико-электронные приборы и системы» в 2010 г., аспирантуру НГУ по специальности «Оптика». Является научным сотрудником в ФГБУН Конструкторско-технологического института научного приборостроения СО РАН. Область научных интересов: оптика, специальные методы обработки цифровых изображений. (Адрес: 630058, Россия, Новосибирск, ул. Русская, 41. E-mail: the-first-person@yandex.ru).

Smirnov Evgenii Sergeevich (b. 1985), graduated from the Siberian State Academy of Geodesy in 2010, majoring in Optoelectronic Devices and Systems, postgraduate student of NSU in Optics. Researcher at the Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering SB RAS. Research interests are optics, special processing of digital images. (Address: 41, Russkaya St., Novosibirsk, 630058, Russia. E-mail: the-first-person@yandex.ru).



Пальчиков Евгений Иванович – родился в 1949 г., окончил Новосибирский государственный университет в 1976 г. по специальности «Физика», доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник в ФГБУН Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН и профессор кафедры «Общая физика» НГУ. Область научных интересов: импульсная электрофизика, регистрация быстропротекающих процессов. (Адрес: 630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 15. E-mail: Palchikov@academ.org).

Palchikov Eugeny Ivanovich (b. 1949) – graduated from Novosibirsk State University in 1971, majoring in Physics and Applied Mathematics. He received her Doctor in Technical Science degree. Associated professor. Key researcher Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS, professor at NSU's General Physics sub department. His research interests are currently focused on pulsed electrophysics, registration of fast processes. (Address: 15, Lavrenteva Av., Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: Palchikov@academ.org).

Самойленко Михаил Сергеевич – родился в 1977 г., окончил Новосибирский государственный технический университет в 2000 г. по специальности «Радиотехника». Инженер-электроник в ФГБУН Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН. Область научных интересов: системы автоматизации и управления процессами, радиофизика. (Адрес: 630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 15. E-mail: saguru@inbox.ru).

Samoylenko Mikhail Sergeevich (b. 1977) – graduated from Novosibirsk State Technical University in 2000 majoring in Radiotechnics. Electronics Engineer at Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS. His research interests are currently focused on automation and process control systems, radiophysics. (Address: 15, Lavrenteva Av., Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: saguru@inbox.ru).

Статья поступила 20 мая 2020 г.
Received may 20, 2020

To Reference:

Palchikova I.G., Karamshuk E.V., Smirnov E.S., Palchikov E.I., Samoylenko M.S. Multifunctional'nyi poluprovodnikovyyi osvetitel' [Multi-functional semiconductor lighting]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2020, no. 3 (48), pp. 62-74. DOI: 10.17212/1727-2769-2020-3-62-74.

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

**ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК
ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Выпуск 3 (48) июль–сентябрь 2020

Выпускающий редактор *И.П. Брованова*
Корректор *И.Е. Семенова*
Компьютерная верстка *Н.В. Гаврилова*

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции
Издание соответствует коду 95 2000 ОК 005-93 (ОКП)

Подписано в печать 16.12.2020. Выход в свет 18.12.2020. Бумага офсетная. Формат 70×108 1/16
Тираж 300 экз. Уч.-изд. л. 6,65. Печ. л. 4,75. Изд. № 227. Заказ № 163. Цена свободная

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630073, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20