

Расчет тепловых режимов преобразующей аппаратуры с применением электронной базы библиотек ЭКБ космического применения

М. В. Щербаков, *shcherbakov_mv@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

А. Н. Голиков, *golikov_an@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Д. С. Лепешкин, *lepeshkin_ds@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

М. А. Фролов, *frolov.ma@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. В статье раскрыта проблема необходимости создания отраслевой электронной базы библиотек электронной компонентной базы космического применения и приведено решение задачи совершенствования процесса разработки бортовой аппаратуры, в частности автоматизации расчета тепловых режимов за счет создания методики теплового расчета и электронной базы библиотек. Представлена разработанная на базе методики и алгоритма оболочка специализированной программы автоматизации расчета тепловых режимов, применение которой в совокупности с электронной базой библиотек электронной компонентной базы космического применения позволяет исключить погрешности и ошибки аналитического расчета, обеспечить безотказную работу преобразующей аппаратуры и систем на ее основе при воздействии рабочих температур и автоматизировать создание отчетной документации согласно требованиям единой системы конструкторской документации.

Ключевые слова: тепловой расчет, температура, методика, алгоритм, блок-схема, программное обеспечение, база данных, электронная компонентная база

Calculation of Thermal Modes of the Transformation Equipment using the Electronic Base of the Libraries of EEE Parts of Space Application

M. V. Shcherbakov, *shcherbakov_mv@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

A. N. Golikov, *golikov_an@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

D. S. Lepeshkin, *lepeshkin_ds@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

M. A. Frolov, *frolov.ma@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

Abstract. The article solves the problem of the necessity to create a branch electronic base of the libraries of electrical, electronic, and electromechanical (EEE) parts of space application. The paper also gives the solution of the problem of the improvement of the process of the onboard equipment development, in particular automation of calculation of the thermal modes due to creation of a technique of thermal calculation and electronic base of libraries. The shell of the specialized program of automation of calculation of the thermal modes developed on the basis of the technique and algorithm which application together with the electronic base of libraries of EEE parts of space application allows one to exclude errors and mistakes of analytical calculation, ensure no-failure operation of the transformation equipment and systems based on it at the influence of working temperatures and automatize creation of reporting documentation according to the requirements of uniform system of design documentation is presented.

Keywords: thermal calculation, temperature, technique, algorithm, flow chart, software, database, EEE parts

Современное приборостроительное предприятие — это неразрывное и равнозначное сочетание производственных и информационных технологий. Повышение конкурентоспособности предприятия напрямую связано с управлением одним из стратегических ресурсов — информацией о продукции. Развитие технологий создания радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) и электронной компонентной базы (ЭКБ) изделий ракетно-космической техники (РКТ) определяется уровнем информационных технологий.

Высокие требования заказчика к техническим характеристикам космических аппаратов, к сроку их активного существования в условиях воздействия факторов космического пространства входят в противоречие с проблемами, характерными для современной российской промышленности при производстве ЭКБ — технологической основы РЭА космического назначения. От качества и надежности ЭКБ зависит качество и надежность бортовой и наземной РЭА.

Учитывая критичность развития космической отрасли и ее импортнезависимости, государство должно сделать своей целевой задачей восстановление способности полностью самостоятельно производить космические системы.

Таким образом, одной из наиболее актуальных задач является совершенствование процесса создания конкурентоспособной отечественной РЭА и ЭКБ, соответствующей заданным параметрам качества и надежности изделий РКТ. Вновь разработанные и созданные, а также рекомендуемые к применению РЭА и ЭКБ должны быть каталогизированы, структурированы и сведены в отраслевую электронную базу библиотек (ЭББ) электронной компонентной базы (ЭКБ) космического применения (КП), обеспечивая доступ предприятиям ракетно-космической отрасли на всем жизненном цикле изделия, что позволит существенно усовершенствовать процесс разработки бортовой аппаратуры, обеспечивая процесс разработки и производства актуальными верифицированными данными ЭКБ.

При эксплуатации в обособленных климатических условиях преобразующей аппаратуры (ПА) космического применения важно обеспечить требуемый тепловой режим ЭКБ и безотказность работы ПА в целом. Температура среды, окружающей ПА,

может варьироваться от $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, что может привести к отказу электроники, входящей в ее состав [1]. Существует множество различных методов анализа тепловых режимов, где оценка надежности электроники осуществляется по вероятности ее безотказной работы, которая рассчитывается исходя из ряда критериев. Наиболее важным критерием является стойкость ЭКБ, входящих в ПА, к воздействию температуры окружающей среды. Существующие аналитические методы расчета ПА с малым количеством ЭКБ дают достаточно точные результаты при рассмотрении теплового процесса как процесса теплопередачи, однако при расчете теплового режима сложных приборов или систем, содержащих большое количество ЭКБ, расчеты становятся громоздкими и трудоемкими, что увеличивает риск появления ошибок и погрешности в получаемых результатах.

Рассмотрим в качестве примера совершенствования процесса разработки бортовой аппаратуры с применением ЭББ ЭКБ КП автоматизацию теплового расчета датчика давления [2] с электронным преобразователем емкости в код, конструкционная схема которого представлена на рис. 1 [3]. Приемная полость датчика — штуцер 1 воспринимает давление, под действием которого прогибается мембрана 2, вследствие чего изменяется межэлектродный зазор между подвижной 4 и неподвижной 5 обкладками конденсатора, значение перемещения которых передается к защищенным гермопереходником 3 печатным платам 6.

Вероятность неразрушения электронного преобразователя (ЭП) рассматриваемого датчика давления за время непрерывной работы определяется на основе эксплуатационной интенсивности отказов ЭКБ в результате перегрева по формуле:

$$P_{\text{ЭП}}(t_{\text{пр}}) = e^{-t_{\text{пр}} \cdot u \cdot \sum_{i=1}^m A_i \cdot \lambda_{\text{бсг}}(\lambda_{\text{бсг}}) \cdot \prod_{i=1}^l M_i}, \quad (1)$$

где $t_{\text{пр}}$ — время непрерывной работы;

u — коэффициент качества производства аппаратуры;

A_i — число изделий i -го типа;

m — число типов изделий;

$\lambda_{\text{бсг}}$ — базовая интенсивность отказов группы;

$\lambda_{\text{г}}$ — исходная интенсивность отказов типа ЭКБ;

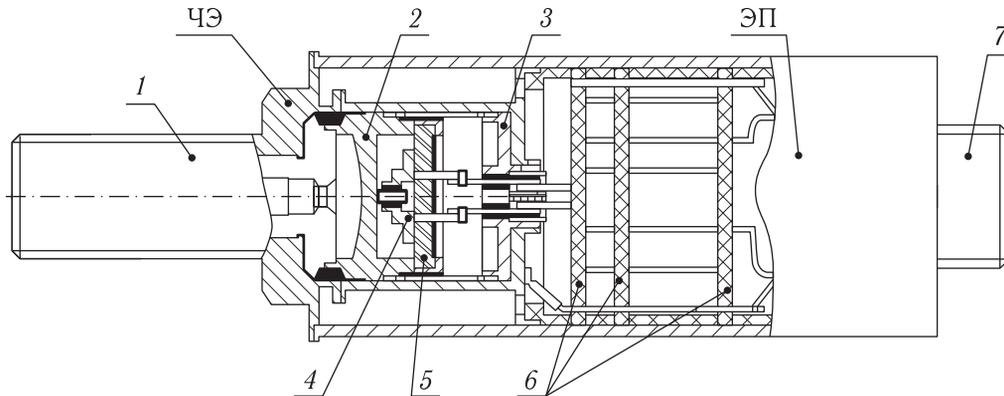


Рис. 1. Датчик давления с электронным преобразователем [3]. 1 — штуцер; 2 — мембрана; 3 — гермопереходник; 4 — подвижная обкладка конденсатора; 5 — неподвижная обкладка конденсатора; 6 — платы; 7 — вилка; ЧЭ — чувствительный элемент; ЭП — электронный преобразователь

M_i — коэффициент, учитывающий изменение эксплуатационной интенсивности отказов в зависимости от перегрева;

l — числа учитываемых факторов эксплуатационной интенсивности отказов ЭКБ в результате перегрева.

Основываясь на том, что коэффициенты, учитывающие изменение эксплуатационной интенсивности отказов в зависимости от перегрева (M_i), должны быть меньше допустимого значения нагрева ЭКБ, предложена пошаговая методика расчета тепловых режимов, состоящая из трех этапов и обеспечивающая требуемые параметры безотказной работы ПА.

1 этап. Определяются исходные данные, необходимые для проведения расчета, такие как геометрическая форма корпуса, включая его габаритные размеры, параметры окружающей среды: давление и температура, а также параметры каждого элемента ЭКБ: объем, площадь поверхности и номинальная рассеиваемая мощность. Для расчета тепловых режимов емкостного преобразователя был составлен перечень ЭКБ, входящих в состав ЭП, приведенный в табл. 1 [3], а также габаритные размеры внутренней полости ЭП и параметры окружающей среды, представленные в табл. 2 [3].

2 этап. Исходя из полученных данных параметров корпуса и параметров каждого ЭКБ для корпуса в зависимости от его геометрической формы рассчитываются его площадь (S_k) и объем корпуса (V_k). В нашем случае для ЭП цилиндри-

Таблица 1. Перечень ЭКБ ЭП

№	Наименование ЭКБ	Кол., <i>n</i> шт.	Тип ЭКБ
1	5101НВ015 АЕНВ.431320.152ТУ	1	Интегральные микросхемы
2	1867ВЦ5Т АЕЯР.431280.536ТУ	1	
3	1967ВЦ2Ф АЕНВ.431280.088ТУ	1	
4	5559ИН10АУ АЕЯР.431230.645ТУ	1	
5	1310НМ01 (разработка АО «ПКК Миландр»)	1	
6	Р1-16 АЛЯР.434110.002ТУ	19	Резисторы
7	К53-22 ОЖ0.464.158ТУ	4	Конденсаторы
8	К10-17в ОЖ0.460.107ТУ	7	

ческой формы площадь и объем определяются по формулам (2) и (3) соответственно:

$$S_k = 2(\pi r^2 + \pi r l), \quad (2)$$

$$V_k = \pi r^2 l. \quad (3)$$

Далее по формуле (4) определяется коэффициент заполнения корпуса ЭП (K_3), исходя из значений которого по формуле (5) находится площадь нагретой зоны (S_k) [4]:

$$K_3 = \frac{v_{эл}}{V_k}, \quad (4)$$

$$S_3 = 2(\pi r^2 + \pi r l \times K_3), \quad (5)$$

Таблица 2. Исходные данные для проведения расчета тепловых режимов ЭП

Наименование	Обозначение	Значение	Ед. изм.
Длина	l	100	мм
Радиус	r	12,5	мм
Давление снаружи корпуса	$H1$	101 800	Па
Давление внутри корпуса	$H2$	101 800	Па
Минимальная температура эксплуатации	T_{\min}	-40	°С
Максимальная температура эксплуатации	T_{\max}	60	°С
Объем ЭКБ	$v_{\text{эл}}$	0,000023471	м ³
Рассеиваемая мощность ЭКБ	P_3	1,57925	Вт

где l, r — длина и радиус внутренней полости ЭП соответственно.

По полученным значениям площади корпуса и площади нагретой зоны рассчитывается удельная мощность корпуса блока и нагретой зоны корпуса блока [4]:

$$q_k = \frac{P_3}{S_k}, \quad (6)$$

$$q_3 = \frac{P_3}{S_3}, \quad (7)$$

где P_3 — рассеиваемая мощность ЭКБ.

Подставив полученные расчетные значения удельной мощности корпуса блока и нагретой зоны корпуса блока по формулам (6) и (7) в формулы (8) и (9), получаем коэффициенты удельной мощности корпуса блока до и после нагрева соответственно [4]:

$$\vartheta_1 = 0,1472 \cdot q_k - 0,2962 \cdot 10^{-3} \cdot q_k^2 + 0,3127 \cdot 10^{-6} \cdot q_k^3, \quad (8)$$

$$\vartheta_2 = 0,139 \cdot q_3 - 0,1223 \cdot 10^{-3} \cdot q_3^2 + 0,3127 \cdot 10^{-6} \cdot q_3^3. \quad (9)$$

Для учета влияния на ЭКБ давления снаружи корпуса ($H1$) и внутри корпуса ($H2$) определяются коэффициенты влияния давления среды сна-

ружи (K_{H1}) и внутри (K_{H2}) корпуса блока по формулам (10) и (11) соответственно [4]:

$$K_{H1} = 0,82 + \frac{1}{0,925 + 4,6 \cdot 10^{-5} \cdot H_1}, \quad (10)$$

$$K_{H2} = 0,82 + \frac{1}{0,925 + 4,6 \cdot 10^{-5} \cdot H_2}. \quad (11)$$

Далее, исходя из полученных коэффициентов по формулам (8)–(12), рассчитываются перегрев корпуса блока (ϑ_k) по формуле (12), перегрев нагретой зоны корпуса блока (ϑ_3) по формуле (13) и средний перегрев воздуха в блоке (ϑ_B) по формуле (14) [4]:

$$\vartheta_k = \vartheta_1 \cdot K_{H1}, \quad (12)$$

$$\vartheta_3 = \vartheta_k - (\vartheta_2 - \vartheta_1) \cdot K_{H2}, \quad (13)$$

$$\vartheta_B = \frac{(\vartheta_k - \vartheta_3)}{2}. \quad (14)$$

Для каждого элемента определяется перегрев поверхности в зависимости от перегрева нагретой зоны корпуса ($\vartheta_{\text{эл}}$) по формуле (15) и перегрев поверхности ($\vartheta_{\text{эс}}$) в зависимости от среднего перегрева воздуха в блоке (16) [4]:

$$\vartheta_{\text{эл}} = \vartheta_3 \left(a + b \frac{q_{\text{эл}}}{q_3} \right), \quad (15)$$

$$\vartheta_{\text{эс}} = \vartheta_B \left(a + b \frac{q_{\text{эл}}}{q_3} \right), \quad (16)$$

где коэффициенты $a = 0,75$ и $b = 0,25$ найдены методом наименьших квадратов с использованием экспериментальных данных по тепловым режимам реальных радиоэлектронных аппаратов.

3 этап. Принимая во внимание, что корпус датчика непосредственно контактирует с окружающей средой, определяем суммарную температуру каждой зоны и элемента по формуле (17) [3]:

$$T = T_{\text{ос}} + \vartheta_{\text{эл}}, \quad (17)$$

где $T_{\text{ос}}$ — температура окружающей среды.

Результаты расчета температуры перегрева датчика давления с ЭП по приведенной методике сведены в табл. 3 и не превышают предельных значений температуры эксплуатации (T_{\min}, T_{\max}) ЭП, что позволяет сделать вывод о достаточной надежности ЭКБ датчика при воздействии температуры окружающей среды.

Таблица 3. Результаты расчета теплового режима емкостного датчика давления

Элемент	Параметр	Максимальные значения, °С
Корпус	Перегрев корпуса блока (ϑ_k)	18,6
	Перегрев нагретой зоны корпуса блока (ϑ_3)	35,22
	Средний перегрев воздуха в блоке (ϑ_b)	26,91
5101НВ015	Перегрев поверхности ($\vartheta_{эл}$)	26,5
	Перегрев поверхности ($\vartheta_{эс}$)	20,25
1867ВЦ5Т	Перегрев поверхности ($\vartheta_{эл}$)	31,6
	Перегрев поверхности ($\vartheta_{эс}$)	24,14
1967ВЦ2Ф	Перегрев поверхности ($\vartheta_{эл}$)	26,61
	Перегрев поверхности ($\vartheta_{эс}$)	20,33
5559ИН10АУ	Перегрев поверхности ($\vartheta_{эл}$)	25,62
	Перегрев поверхности ($\vartheta_{эс}$)	20,21
К10-17В	Перегрев поверхности ($\vartheta_{эл}$)	27,38
	Перегрев поверхности ($\vartheta_{эс}$)	20,92
К53-22	Перегрев поверхности ($\vartheta_{эл}$)	27,01
	Перегрев поверхности ($\vartheta_{эс}$)	20,64
Р1-16	Перегрев поверхности ($\vartheta_{эл}$)	47,68
	Перегрев поверхности ($\vartheta_{эс}$)	36,43
1310НМ01	Перегрев поверхности ($\vartheta_{эл}$)	26,6
	Перегрев поверхности ($\vartheta_{эс}$)	20,33

Для обеспечения автоматизации процесса проектирования [5], в частности расчета теплового режима, на основе предложенной методики был разработан алгоритм проведения автоматизированного расчета тепловых режимов, блок-схема которого представлена на рис. 2.

Представленный алгоритм автоматизированного расчета тепловых режимов был реализован в программе для ЭВМ на языке С# [6]. Программа для ЭВМ осуществляет загрузку всех необходимых параметров для расчета из электронной базы библиотек ЭКБ КП, что позволяет в автоматизированном режиме производить расчет теп-

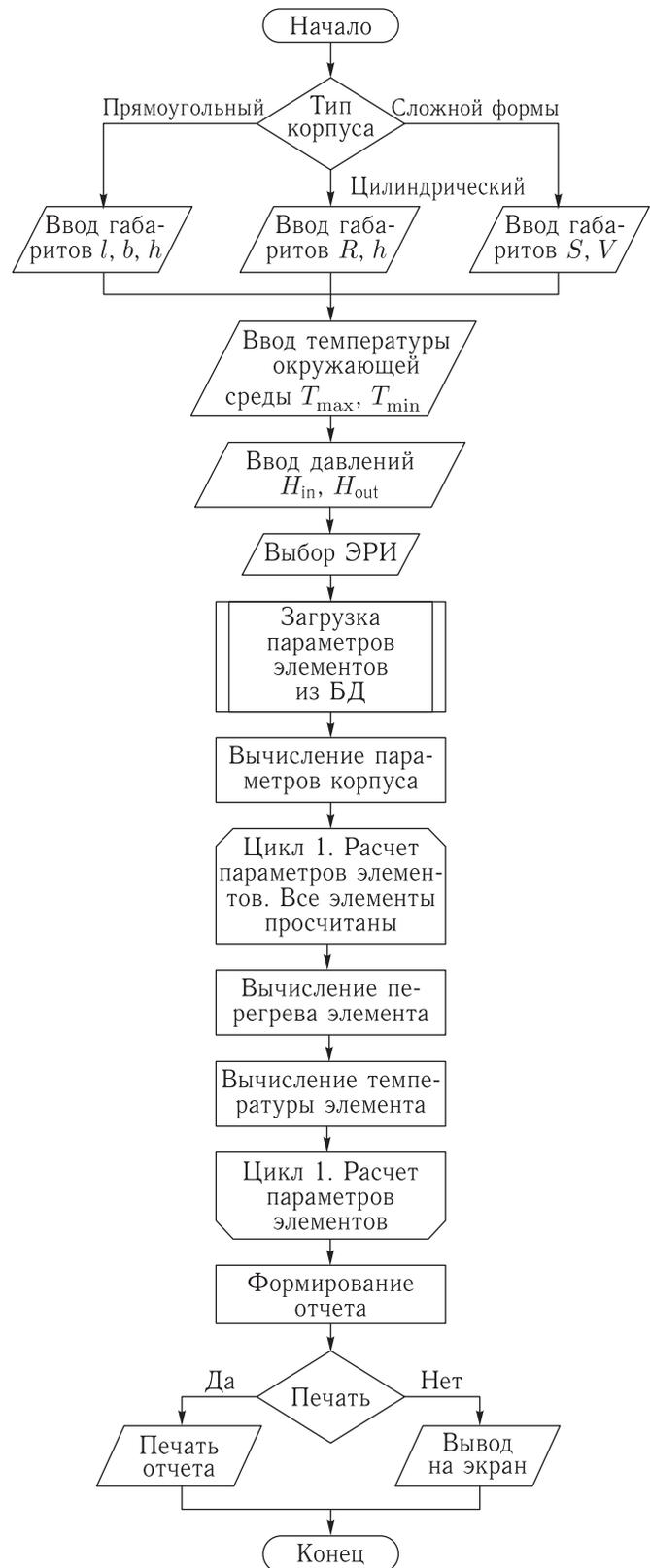


Рис. 2. Блок-схема алгоритма проведения автоматизированного теплового расчета [6]

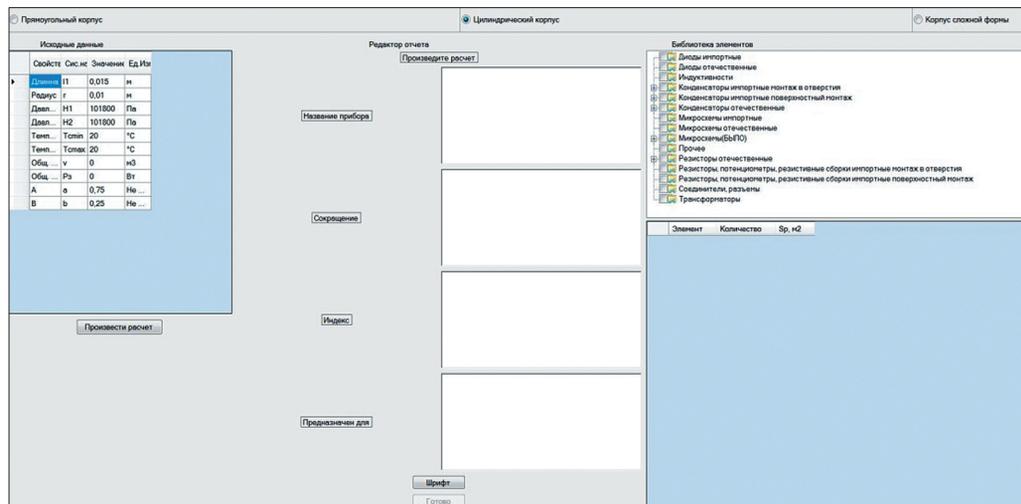


Рис. 3. Оболочка программы автоматизированного расчета теплового режима

лового режима блоков ЭКБ любой сложности в зависимости от характеристик ПА и условий эксплуатации (воздействующие температуры и давления), а также на основе полученных результатов в автоматическом режиме оценивать работоспособность используемых ЭКБ в заданных условиях эксплуатации и осуществлять вывод на бумажный носитель результатов с формированием конструкторского документа, отвечающего требованиям ЕСКД. Оболочка программы для ЭВМ представлена на рис. 3.

Заключение

Разработанные методика с алгоритмом расчета тепловых режимов ПА, созданные программа автоматизированного расчета тепловых режимов и ЭББ ЭКБ КП позволили автоматизировать [7] процесс проектирования ПА, исключить погрешности и ошибки аналитического расчета, сократить сроки разработки, снизить трудоемкость вычислений при проектировании и разработке ПА, а также обеспечить требуемую надежность ПА КП на ранних стадиях проектирования и реализовать автоматическое создание отчетной документации согласно требованиям ЕСКД. Результаты расчета теплового режима ЭП подтверждены результатами испытаний и эксплуатацией в составе изделия. Это свидетельствует о том, что использование ЭББ ЭКБ КП позволяет усовершенствовать процесс разработки бортовой аппаратуры космического применения.

Список литературы

1. Мусаев Р. Ш., Фролов М. А., Баранов А. С. Повышение прочностных и эксплуатационных характеристик системы телеметрии посредством проведения имитационного моделирования механического удара // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль, 2014, № 1(7). С. 88–92.
2. Фролов М. А. Математическая модель емкостного датчика абсолютного давления / Надежность и качество. 2014: Труды Междунар. симп. 2014, т. 1. С. 213–216.
3. Бухгольц В. П., Тисевич Э. Г. Емкостные преобразователи в системах автоматического контроля и управления. М: Энергия, 1972. 82 с.
4. Роткоп Л. Л., Спокойный Ю. Е. Обеспечение тепловых режимов при конструировании радиоэлектронной аппаратуры. М: Сов. радио, 1976. 232 с.
5. Федосов Е. А, Фролов К. В., Попов Е. П. Автоматическое управление. Теория. М: Машиностроение, т. 1–4, 2000. 688 с.
6. Фролов М. А., Мусаев Р. Ш., Рыбаков И. М., Суханов А. С. Программа расчета теплового режима радиоэлектронной аппаратуры / Свидетельство № 2015617478. Заявка 2015614319 от 25.05.2015; опубл. 13.07.2015.
7. Воронов А. А. Основы теории автоматического управления: Автоматическое регулирование непрерывных линейных систем. 2-е изд. М: Энергия, 1980. 312 с.