

УДК 621.396.6:004.9

*А. С. Баранов, И. М. Рыбаков, М. А. Фролов***ТЕПЛОВАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА  
И КОНТРОЛЯ***A. S. Baranov, I. M. Rybakov, M. A. Frolov***THERMAL MODEL OF MONITORING  
AND CONRTOL SYSTEM**

**А н н о т а ц и я.** При эксплуатации датчико-преобразующей аппаратуры, преобразователей и систем в жестких климатических условиях важно обеспечить требуемый тепловой режим и безотказную работу. Применение современных САЕ-программ позволяет ведомо пронаблюдать и оценить тепловой режим изделия в процессе его работы. Представлено имитационное моделирование, позволяющее наблюдать за работой системы мониторинга и контроля и определять наилучшее конструктивное решение для введения в конструкцию элементов искусственного охлаждения.

**A b s t r a c t.** Providing of thermal mode and non-failure work is important, when sensors, convertors and systems works in the hard environmental conditions. Applying of modern CAE-programs allows observing and estimating obviously a thermal mode of a product in the course of its work. Imitational modeling, which shown in this article, allows to observe work of monitor and control system and determines the best constructive decision for artificial cooler element.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** система мониторинга и контроля, тепловой режим, Flow Simulation SolidWorks, радиоэлектронная аппаратура, САЕ-анализ.

**К e y w o r d s:** monitoring and control system, thermal mode, Flow Simulation SolidWorks, radio-electronic equipment, CAE-analysis.

Одно из основных требований к датчико-преобразующей аппаратуре (ДПА) и системам – это надежная и безотказная работа в жестких климатических условиях: например, температуры в помещениях на стартовых комплексах могут варьироваться от минус 40 до 55 °С. Для того чтобы удовлетворять этим требованиям, необходимо следить за обеспечением тепловых режимов работы ДПА и систем.

Существует множество различных методов анализа тепловых режимов. Аналитические расчеты дают достаточно точный вариант только при рассмотрении теплового процесса как процесса теплопередачи, однако при расчете теплового режима сложных приборов или систем необходимо учитывать как конвективный теплообмен, так и (в некоторых случаях) излучение. Множество усредняющих коэффициентов и большая погрешность результатов делают аналитические расчеты непригодными для точной оценки работы изделия. Поэтому, чтобы рассмотреть и оценить работу изделий, необходимо применение специализированных программных продуктов, позволяющих провести расчет тепловых режимов любой сложности, таких как SolidWorks, ANSYS, Nastran и др. В данной статье представлен расчет теплового режима работы системы мониторинга и контроля (СМиК) в программном продукте SolidWorks.

При разработке СМиК был проведен аналитический расчет теплового режима блоков в соответствии с условиями их эксплуатации, так как каждый электрошкаф системы находится в определенных климатических условиях согласно техническим условиям:

1. Блок терминальный находится в отапливаемом помещении в диапазоне температур от 15 до 35 °С.

2. Блок коммутации 00 находится в неотапливаемом помещении в диапазоне температур от минус 40 до 55 °С.

3. Блок коммутации 01 находится в неотапливаемом помещении в диапазоне температур от минус 40 до 55 °С.

Электрошкафы компонуются определенными модулями в зависимости от выполняемых функций шкафа. В процессе работы каждый модуль нагревается и излучает тепловую энергию в окружающее пространство, таким образом формируя температурное поле, которое состоит из значений температур ее элементов, а также температуры в различных точках воздуха внутри шкафа. Большинство модулей работает при температурах от минус 40 до 70 °С, что является критерием оценки результата моделирования. Из представленных выше данных видно, что перегрев терминального блока наиболее вероятен при температуре окружающей среды 35 °С для терминального блока и при температуре 55 °С для блоков коммутации.

Для расчета теплового режима использовалась методика расчета температуры в герметичном корпусе [1].

1. Определение поверхности корпуса блока:

$$V = abh = 0,264 \text{ м}^3;$$

$$S_k = 2[ab + (a + b)h] = 2,68 \text{ м}^2,$$

где  $a$  – длина, м;  $b$  – ширина, м;  $h$  – высота, м;  $V$  – объем корпуса, м<sup>3</sup>;  $S_k$  – площадь поверхности корпуса, м<sup>2</sup>.

2. Условная поверхность нагретой зоны:

$$K_3 = \frac{V_i}{V} = 0,083;$$

$$S_3 = 2[ab + (a + b)hK_3] = 0,663 \text{ м}^2,$$

где  $V_i = 0,022$  – объем элементов внутри блока, м<sup>3</sup>;  $K_3$  – коэффициент заполнения блока;  $S_3$  – удельная площадь поверхности блока, м<sup>2</sup>.

3. Рассеиваемая мощность:

$$q_k = \frac{P_3}{S_k} = 47,366 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}; \quad q_3 = \frac{P_3}{S_3} = 191,367 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2},$$

где  $P_3 = 126,94$  [Вт] – мощность, рассеиваемая элементами;  $q_k$  – общая рассеиваемая мощность;  $q_3$  – удельная рассеиваемая мощность.

4. Находим коэффициенты  $u_1$  и  $u_2$  в зависимости от удельной мощности корпуса блока (рис. 1).

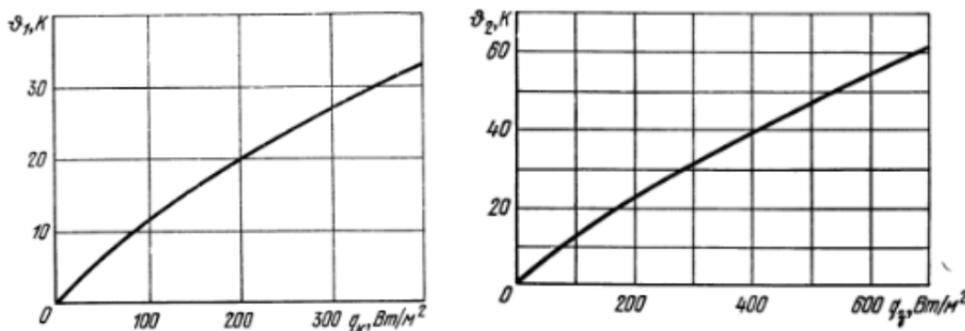
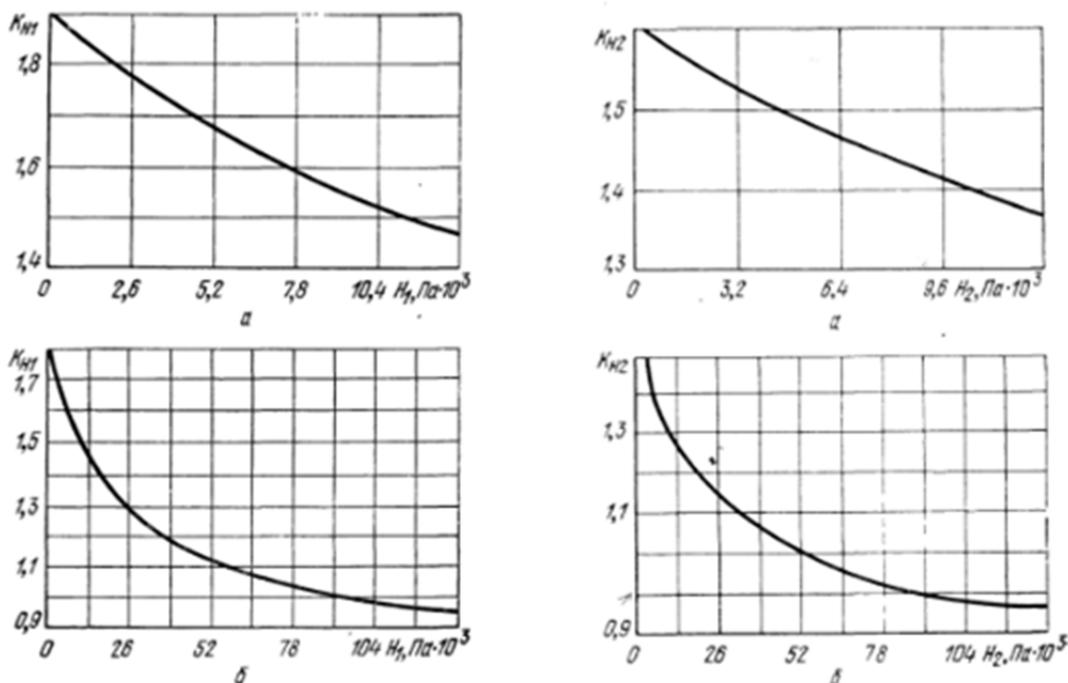


Рис. 1. Зависимости перегрева корпуса ( $u_1$ ) и перегрева нагретой зоны ( $u_2$ ) от удельной мощности рассеивания

Принимаем  $u_1 = 4,7$ ;  $u_2 = 21,5$ .

Находим коэффициент  $K_{H1}$  и  $K_{H2}$  в зависимости от давления среды вне корпуса блока  $H_1$  и  $H_2$  (рис. 2).



Зависимость  $K_{H1}$  от давления окружающей среды: а)  $0 \leq H_1 \leq 2,6 \cdot 10^3$  Па; б)  $0 \leq H_1 \leq 130 \cdot 10^3$  Па  
 Зависимость  $K_{H2}$  от давления среды внутри аппарата а)  $0 \leq H_2 \leq 12,8 \cdot 10^3$  Па; б)  $0 \leq H_2 \leq 130 \cdot 10^3$  Па

Рис. 2. Зависимости коэффициентов  $K_{H1}$  и  $K_{H2}$

При давлении вне корпуса  $H_1 = H_2 = 101325$  Па:

$$K_{H1} = 0,82 + \frac{1}{0,925 + 4,6 \cdot 10^{-5} \cdot H_1} = 0,999; \quad K_{H2} = 0,8 + \frac{1}{1,25 + 3,8 \cdot 10^{-5} \cdot H_1} = 0,996.$$

5. Перегрев корпуса блока:  $U_k = u_1 K_{H1} = 4,695$  °С.

6. Перегрев нагретой зоны:  $U_3 = U_k + (u_2 - u_1) K_{H2} = 21,429$  °С.

7. Средний перегрев воздуха в блоке:  $U_B = 0,5(U_k + U_3) = 13,062$  °С.

8. Удельная мощность элемента:  $q_{эл} = \frac{P_{эл}}{S_{эл}} = 383,099 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ ,

где  $P_{эл} = 27,2$  – мощность, рассеиваемая элементом, Вт;  $S_{эл} = 0,071$  – площадь поверхности элемента (вместе с радиатором), м<sup>2</sup>.

9. Перегрев поверхности элемента:  $U_{эл} = U_3(a + b \frac{q_{эл}}{q_3}) = 26,797$  °С.

10. Перегрев окружающей элемент среды:  $U_{эс} = U_B(a + b \frac{q_{эл}}{q_3}) = 16,334$  °С.

11. Температура корпуса блока:  $T_k = U_k + T_c = 39,695$  °С, где  $T_c = 35$  [°С] – температура окружающей среды.

12. Температура нагретой зоны:  $T_3 = U_3 + T_c = 56,429$  °С.

13. Температура поверхности элемента:  $T_{эл} = U_{эл} + T_c = 61,797$  °С.

14. Средняя температура воздуха в блоке:  $T_B = U_B + T_c = 48,062$  °С.

15. Температура окружающей элемент среды:  $T_{эс} = U_{эс} + T_c = 51,334$  °С.

Проведенный аналитический расчет теплового режима работы электрошкафов, входящих в состав СМиК, имеет большую погрешность, и на его основании нельзя судить об эффективности конструкции. Это обуславливается тем, что в расчете не учитываются свойства материалов конструкции и особенности ее геометрии (например, не учитывается плотное расположение РЭА внутри блока). Поэтому для продолжения разработки СМиК принято решение провести расчет с помощью специализированного программного обеспечения (ПО) САЕ-анализа, в частности ПО SolidWorks. Применение современного ПО SolidWorks [2], а именно модуля Flow Simulation, для решения поставленной задачи позволяет оценить характер работы системы посредством проведения имитационного моделирования работы электрошкафов системы с учетом всех воздействующих факторов, таких как:

- свойства окружающей среды (учитывается конвективный теплообмен электрошкафа с окружающим воздухом);
- свойства материала деталей (учитывается теплопередача между входящими в состав электрошкафа радиоэлектронной аппаратурой (РЭА), корпусом и деталями);
- свойства РЭА (учитывается тепловое излучение РЭА в процессе их работы);
- свойства воздушной среды внутри шкафа (возможно провести расчет работы электрошкафа в динамическом режиме, т.е. с учетом движения воздуха внутри блока и времени);
- свойства охлаждающих элементов (при необходимости возможно добавить в расчет элементы искусственного охлаждения, т.е. регулировать поток воздуха внутри электрошкафа).

Для проведения имитационного моделирования [3] построены твердотельные модели электрошкафов, входящих в СМиК, представленные на рис. 3.

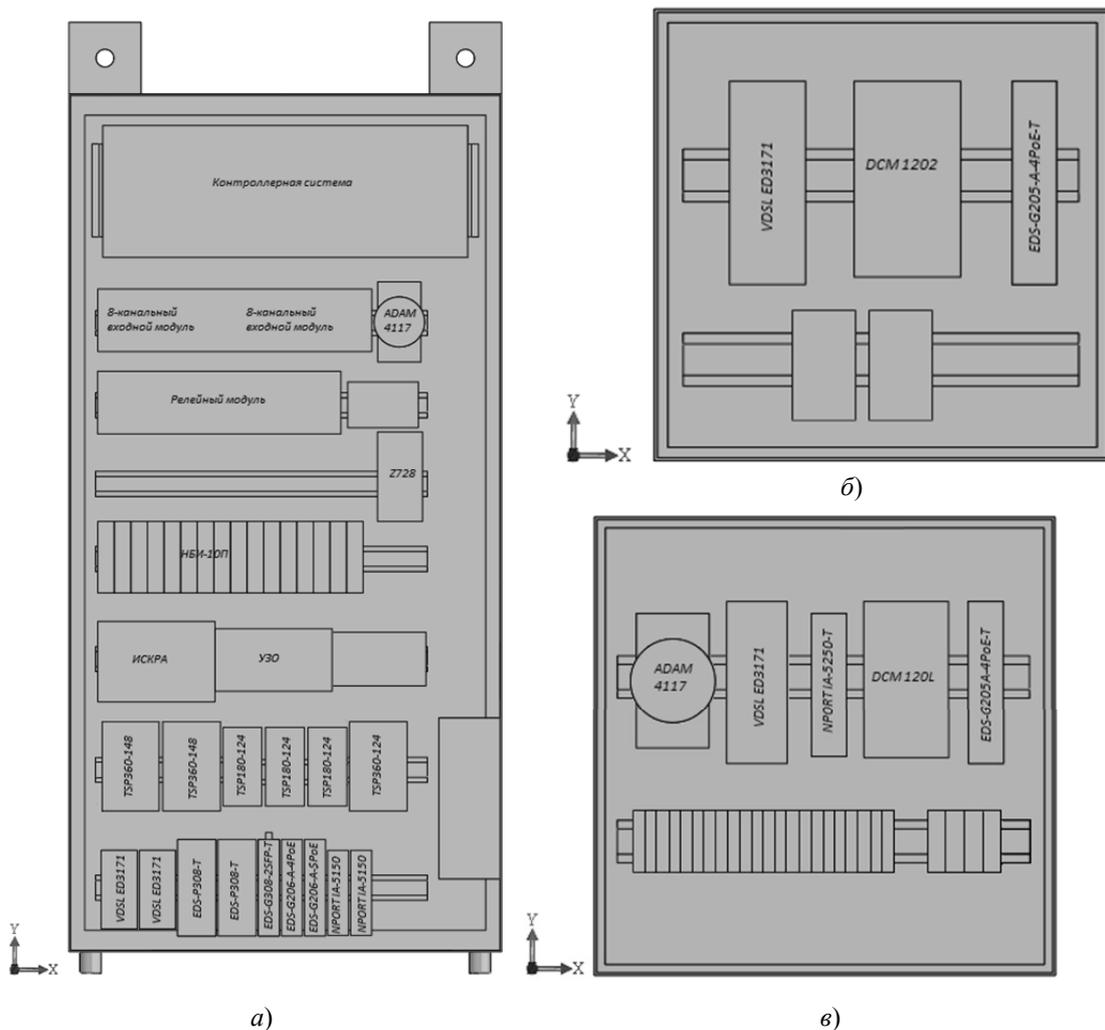


Рис. 3. Твердотельные модели системы мониторинга и контроля:  
 а – терминальный блок; б – блок коммутации 00; в – блок коммутации 01

Значения тепловой мощности каждого элемента системы для проведения моделирования выбирались, исходя из условия критической работы, т.е. 87 % – полезная мощность, 13 % – потери, переходящие в тепловую энергию.

С течением времени при повышении температуры окружающей среды и нагрева элементов, излучающих тепловую энергию, тепловой режим некоторых ПКИ меняется, что влияет на излучаемое тепло. Зависимость выходной мощности от температуры для блоков питания представлена на рис. 4, где видно, что блоки питания имеют стабильное выходное напряжение при температурах от минус 25 °С до 40 °С, при повышении температуры выходная мощность блоков питания падает, а следовательно, и тепловое излучение уменьшается.

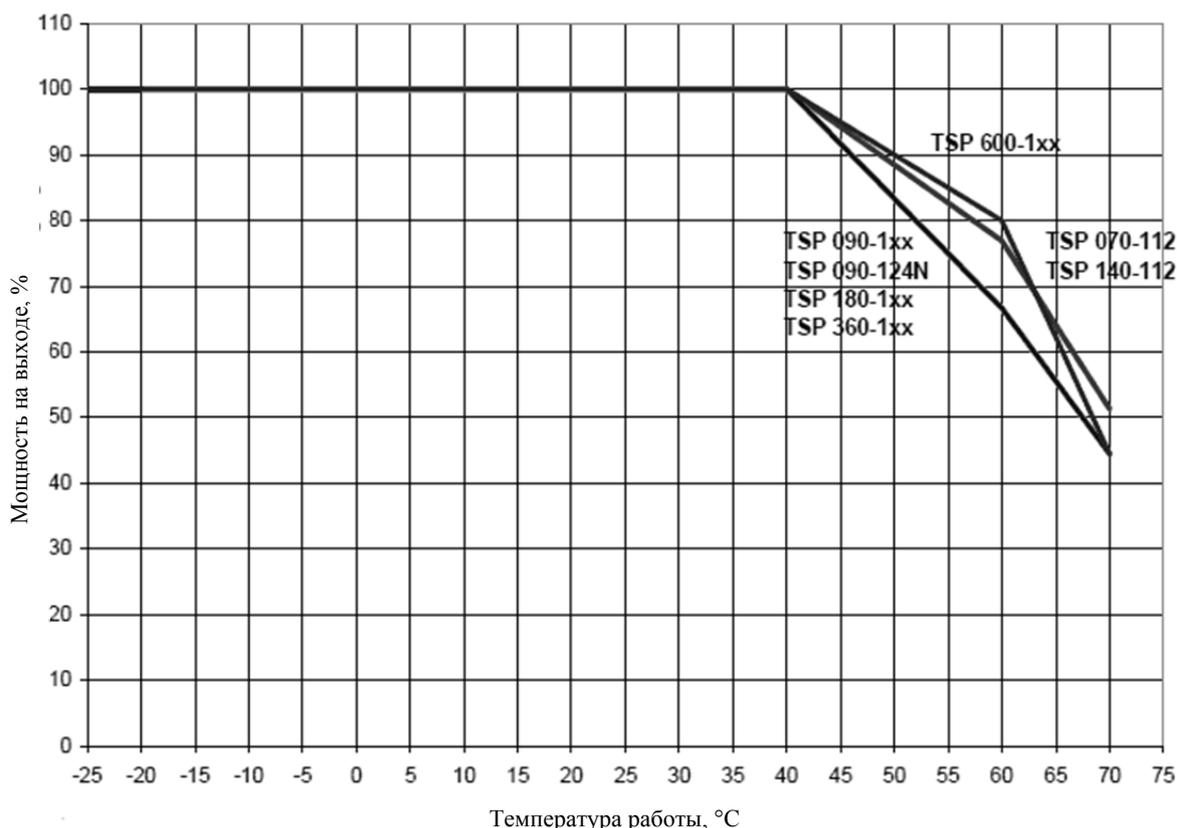


Рис. 4. График зависимости выходной мощности от температуры для блоков питания

В результате моделирования непрерывной работы терминального блока определены значения температуры в блоках при температуре окружающей среды 35 °С. Эпюры полей распределения температур представлены на рис. 5. Рисунок 5,а говорит о том, что максимальная температура внутри блока без элементов искусственного охлаждения составила 132,64 °С, что превышает допустимую температуру работы шкафа, а следовательно, конструкцию необходимо доработать и обеспечить искусственным охлаждением. В связи с конструктивными особенностями шкафа установка элементов искусственного охлаждения возможна только на некоторых стенках шкафа и в определенных местах. В качестве охлаждающего элемента был выбран фильтрующий вентилятор фирмы Rittal, так как он обладает достаточной мощностью для охлаждения шкафа и должен обеспечить требуемый тепловой режим работы. Белая стрелка на эпюрах рис. 5,б–е обозначает общую траекторию движения воздуха в блоке.

Из полученных результатов видно, что введение в конструкцию элементов искусственного охлаждения позволяет понизить максимальную температуру внутри шкафа до 50,42 °С, обеспечив тем самым оптимальный тепловой режим работы.

В результате моделирования непрерывной работы блоков коммутации 00 и 01 получены эпюры полей распределения температуры внутри блоков при температуре окружающей среды 55 °С, представленные на рис. 6.

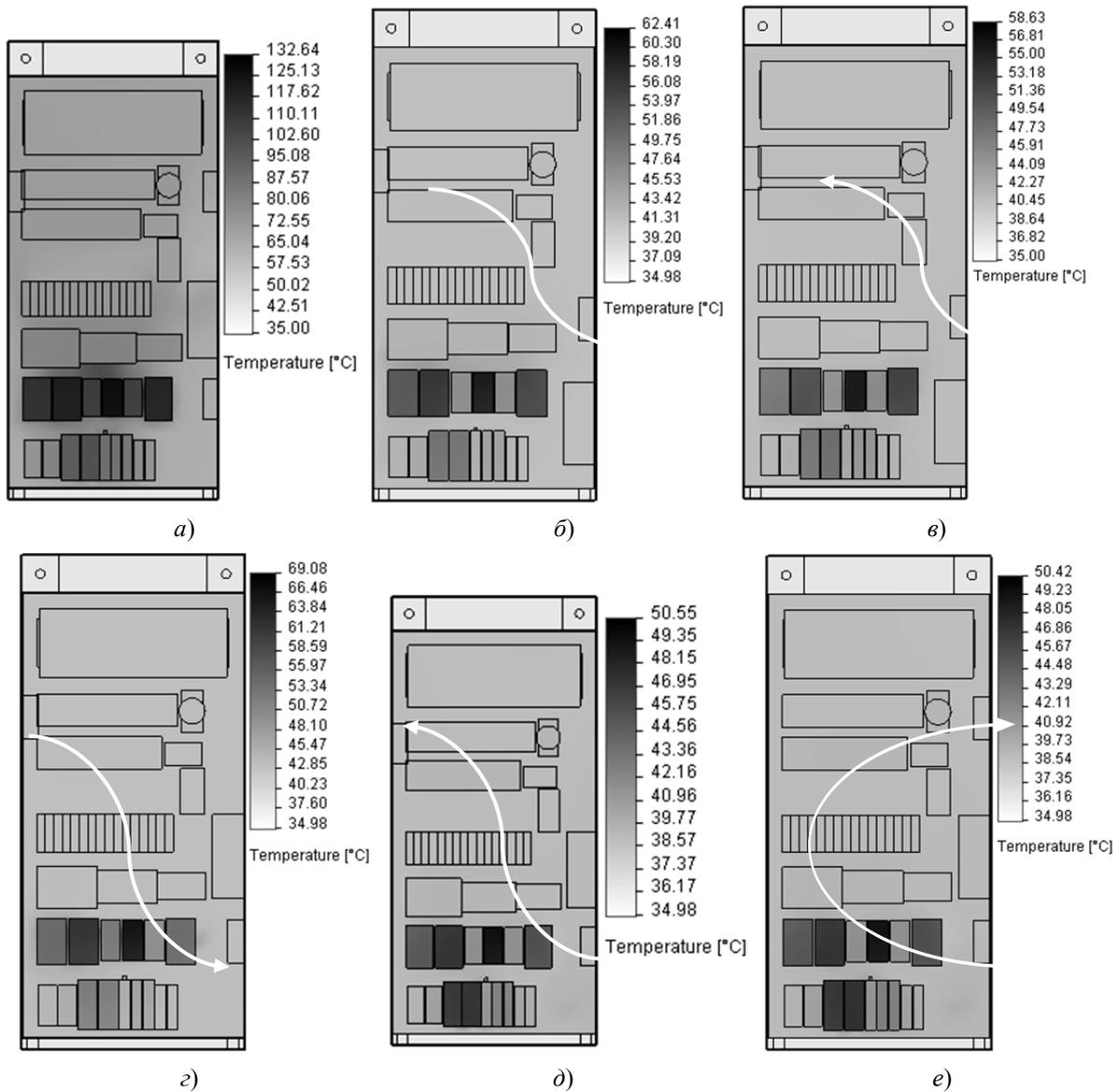


Рис. 5. Эпюры полей распределения температуры терминального блока с вариантами использования элементов искусственного охлаждения

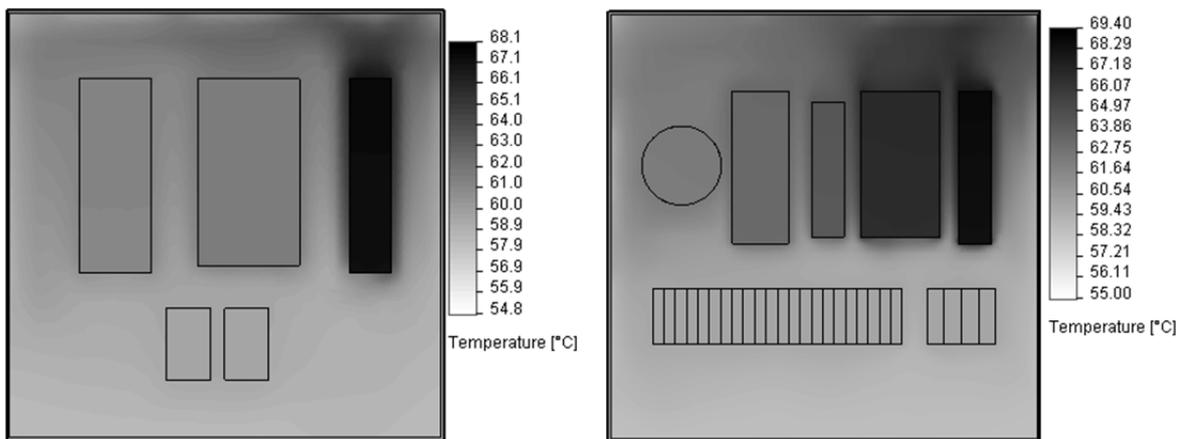


Рис. 6. Эпюры полей распределения температур в блоках коммутации без использования элементов искусственного охлаждения

Максимальная температура нагрева блоков коммутации 00 и 01 составляет 68,1 и 69,4 °С соответственно, что не превышает максимальную температуру работы блока 70 °С.

Нарушение нормального теплового режима работы терминального блока (см. рис. 5,а) обуславливается наличием блоков питания, которые обладают большей выделяемой мощностью теплового излучения, чем другие модули. График работы блока питания (см. рис. 4) позволяет сделать вывод, что перегрев корпуса до температуры 132,64 °С привел бы к отказу блоков питания, а соответственно, и к отказу системы.

Применение современного программного обеспечения САЕ-анализа позволило на ранних стадиях разработки рассмотреть характер работы системы мониторинга и контроля, оценить и устранить возможность возникновения дорогостоящих ошибок в процессе натурных испытаний электрошкафов на стартовом комплексе. Проведенные работы на раннем этапе проектирования позволяют сделать заключение об актуальности применения современных технологий САЕ-анализа. Результаты имитационного моделирования работы шкафов системы в условиях повышенной температуры (35 и 55 °С) при непрерывном режиме работы показали необходимость изменения конструкции системы – введения дополнительных элементов искусственного охлаждения. Полученные результаты позволили значительно снизить затраты на изготовление и разработку СМиК благодаря исключению вероятности возникновения брака от воздействия перегрева в процессе работы.

### Список литературы

1. Роткоп, Л. Л. Обеспечение тепловых режимов при конструировании радиоэлектронной аппаратуры / Л. Л. Роткоп, Ю. Е. Спокойный. – М. : Сов. радио, 1976. – 232 с.
2. Алямовский, А. А. Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation / А. А. Алямовский. – М. : ДМК Пресс, 2010. – 464 с.
3. Мусаев, Р. Ш. Имитационное моделирование чувствительного элемента тензорезистивного датчика абсолютного давления / Р. Ш. Мусаев, М. А. Фролов, А. А. Трофимов // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2012. – № 2. – С. 51–55.

#### **Баранов Александр Сергеевич**

магистрант, инженер-конструктор 3 категории,  
Научно-исследовательский институт  
физических измерений,  
Пензенский государственный университет  
E-mail: Kamitte11@gmail.com

#### **Baranov Aleksandr Sergeevich**

master's degree student, design engineer  
of third category,  
Scientific-research Institute  
of physical measurements,  
Penza State University

#### **Рыбаков Илья Михайлович**

аспирант, инженер-конструктор 2 категории,  
Научно-исследовательский институт  
физических измерений,  
Пензенский государственный университет  
E-mail: rybakov\_im@mail.ru

#### **Rybakov Il'ya Mikhaylovich**

postgraduate student, design engineer  
of second category,  
Scientific-research Institute  
of physical measurements,  
Penza State University

#### **Фролов Михаил Алексеевич**

аспирант, начальник научно-исследовательской  
лаборатории информационных технологий,  
Научно-исследовательский институт  
физических измерений,  
Пензенский государственный университет  
E-mail: frolov10061987@gmail.com

#### **Frolov Mikhail Alekseevich**

postgraduate student, head of the research laboratory  
of information technologies,  
Scientific-research Institute  
of physical measurements,  
Penza State University

УДК 621.396.6:004.9

#### **Баранов, А. С.**

**Тепловая модель системы мониторинга и контроля** / А. С. Баранов, И. М. Рыбаков, М. А. Фролов // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2014. – № 2 (8). – С. 10–16.