

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА АВТОНОМНОГО ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ

Н. В. Федотов, В. А. Садчикова, Е. А. Никифоров, И. А. Егоров, А. В. Белугин, А. В. Романов

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Представлено описание разработанного в РФЯЦ-ВНИИЭФ автономного источника питания. Рассмотрены возможные варианты материалов теплоизоляции для защиты от отрицательных температур аккумуляторной батареи источника питания. Дано обоснование выбора конструкции источника питания. Представлены расчеты нестационарного теплового режима источника питания и результаты проведенных испытаний на опытном образце.

Введение

Для обеспечения питания переносной пультовой аппаратуры необходим автономный источник питания (ИП) с длительной сохранностью энергии и работоспособностью в жестких режимах разряда в широком диапазоне температур при обеспечении высокой механической прочности. Разработка ИП велась в соответствии с техническим заданием на составную часть опытно-конструкторской работы (ОКР). Целью выполнения составной части ОКР являлась разработка ИП для питания переносной пультовой аппаратуры со встроенным индикатором снятой емкости, взамен аккумуляторных батарей на базе аккумуляторов КНП-А, применяемых для аналогичных целей.

Выбор способа теплоизоляции

В соответствии с ТЗ ИП должен быть работоспособным при температуре окружающей среды от минус 50 до плюс 50 °С. АБ 23 НКМ-5, используемая в ИП, обеспечивает электрические характеристики при температуре от 0 до плюс 50 °С. Время, в течение которого температура АБ достигнет 0 °С при помещении ИП из среды с температурой плюс 20 °С в среду с температурой минус 30 °С, должно быть не менее 2 ч. Срок хранения ИП должен быть не менее 16 лет. ИП должен быть стоек к воздействию атмосферных выпадающих осадков с интенсивностью от 3 до 7 мм/мин, быть работоспособным после воздействия многократных механических ударов с ускорением 39 м/с² и после падения с высоты 0,5 м. Для выполнения этих требований ТЗ АБ должна быть помещена в кожух-корпус, имеющий соответствующую тепловую проводимость, герметичность и достаточную прочность.

Для теплоизоляции АБ от внешней среды рассматривались как материалы, разрешенные к применению отраслевым стандартом: пенопласт ППС, полистирол ПСВ, пенополиуретан ППУ, войлок АТИМ,

так и применение готового корпуса – кейса «Корсар». Рабочая температура пенополиуретана ППУ от минус 40 до плюс 100 °С и срок хранения не более 10 лет. Войлок имеет высокое водопоглощение, низкую стойкость к воздействию плесневелых грибов, а также плотность 90 кг/м³ (плотность ППС17 равна 17 кг/м³). Кейс «Корсар» требовал значительных доработок для установки индикатора снятой емкости. Выбор был сделан в пользу полистирола вспенивающегося ПСВ-С, с формообразованием непосредственно в металлический кожух. Как материал-заменитель выбран пенопласт полистирольный плиточный ППС17 и ПС-1-100 в виде пластин, приклеиваемых к стенкам кожуха. Выбранные материалы имеют коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,04$ Вт/м·К.

В процессе проектирования рассматривались различные варианты компоновки ИП. В результате был выбран вариант конструкции, представленный на рис. 1. Тепловая схема ИП представлена на рис. 2. В тепловой схеме не показана проводимость металлического кожуха (лист АМцМ 1,5) и в последующих расчетах она соответственно не учитывалась.

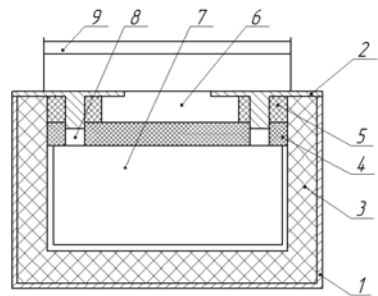


Рис. 1. Компоновка ИП: 1 – кожух; 2 – крышка; 3, 4, 5 – теплоизоляция; 6 – индикатор снятой емкости; 7 – АБ; 8 – текстолитовые втулки; 9 – ручка для переноски

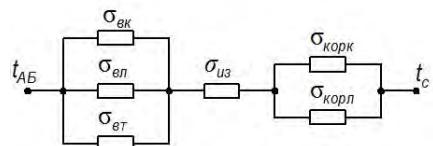


Рис. 2. Тепловая схема ИП: $t_{АБ}$ – температура АБ; t_c – температура среды; $\sigma_{вк}$ – проводимость воздушной прослойки за счет конвекции; $\sigma_{вл}$ – проводимость воздушной прослойки за счет излучения; $\sigma_{вт}$ – проводимость воздушной прослойки за счет теплопроводности; $\sigma_{из}$ – проводимость пенопластовой теплоизоляции; $\sigma_{корк}$ – проводимость корпус-окружающая среда за счет конвекции; $\sigma_{корл}$ – проводимость корпус-окружающая среда за счет излучения

Внутренние размеры оболочки теплоизоляции определяются размерами АБ(260 × 85 × 133) мм, величиной воздушного зазора и равны $l_1 = 275$ мм, $l_2 = 137$ мм, $l_3 = 189$ мм. Для определения толщины слоя теплоизоляции и соответственно внешних размеров оболочки теплоизоляции необходимо вычислить темп охлаждения m , $с^{-1}$, который должен иметь ИП [1]:

$$m = \frac{1}{\tau_{12}} \ln \frac{t_1 - t_c}{t_2 - t_c}, \quad (1)$$

где τ_{12} – время, требуемое для охлаждения АБ, до температуры t_2 , с; t_1 – начальная температура АБ, °С; t_2 – конечная температура АБ, °С.

Подставляя в формулу (1) время $\tau_{12} = 10800$ с и остальные величины из ТЗ ($t_1 = 20$ °С, $t_2 = -30$ °С), получаем темп равным $4,73 \cdot 10^{-5} с^{-1}$.

При этом темп охлаждения также определяется по формуле [2]:

$$m = \frac{\sigma}{C}, \quad (2)$$

где σ – тепловая проводимость от АБ к внешней среде, Вт/К; C – тепловая емкость АБ, Дж/К.

Зная темп охлаждения ИП, и, используя усредненные коэффициенты теплоотдачи от кожуха в среду, между АБ и оболочкой теплоизоляции, можно определить требуемую толщину слоя теплоизоляции.

АБ имеет объем $0,0029$ м³ и массу $6,6$ кг, что соответствует плотности 2276 кг/м³. Для упрощения предполагаем, что АБ изготовлена из однородного материала и по коэффициенту теплопроводности и удельной теплоемкости идентична сплаву АМц. Тогда тепловая емкость АБ определяется по следующей формуле:

$$C = c_p \cdot M, \quad (3)$$

где c_p – удельная теплоемкость АБ, Дж/кг·К; M – масса АБ, кг.

Тепловая проводимость от АБ к внешней среде определяется по формуле [3]:

$$\sigma = \frac{1}{\sigma_{АБ}^{-1} + \sigma_{возд}^{-1} + \sigma_{из}^{-1} + \sigma_{кож}^{-1}}, \quad (4)$$

где $\sigma_{АБ}$ – тепловая проводимость АБ, Вт/К; $\sigma_{возд}$ – тепловая проводимость воздушного зазора между АБ и теплоизоляцией, Вт/К; $\sigma_{из}$ – тепловая проводимость теплоизоляции, Вт/К; $\sigma_{кож}$ – тепловая проводимость от кожуха ИП к окружающей среде, Вт/К.

В формуле (4) неизвестна только проводимость теплоизоляции. Тепловая проводимость АБ[4]:

$$\sigma_{АБ} = \frac{2\lambda_{АБ}S_{АБ}}{L_{АБ}}, \quad (5)$$

где $\lambda_{АБ}$ – коэффициент теплопроводности АБ, Вт/м·К; $S_{АБ}$ – площадь поверхности АБ, м²; $L_{АБ}$ – определяющий размер АБ, м.

Определяющий размер АБ:

$$L_{АБ} = 0,254\sqrt{S_{АБ}}, \quad (6)$$

Проводимость воздушной прослойки от АБ к внутренней поверхности теплоизоляции[2]:

$$\sigma_{возд} = (\alpha_{кв} + \alpha_{л}) \cdot S_{в} + (\alpha_{кг} + \alpha_{л}) \cdot S_{г}, \quad (7)$$

где $\alpha_{кв}$ – коэффициент теплоотдачи конвекцией для вертикальной прослойки, Вт/м²·К; $\alpha_{кг}$ – коэффициент теплоотдачи конвекцией для горизонтальной прослойки, Вт/м²·К; $\alpha_{л}$ – коэффициент теплоотдачи излучением, Вт/м²·К; $S_{в}$ – площадь вертикальной поверхности АБ, м²; $S_{г}$ – площадь горизонтальной поверхности АБ, м².

Для определения тепловой проводимости от кожуха ИП в окружающую среду необходимо знать внешние размеры кожуха. Принимая в первом приближении толщину теплоизоляции равной 50 мм, получаем размеры $(375 \times 290 \times 289)$ мм и площадь поверхности кожуха $S_{ип} = 0,602$ м². Тогда тепловую проводимость от кожуха ИП в окружающую среду можно определить по формуле [2]:

$$\sigma_{кож} = 9S_{ип}, \quad (8)$$

Таким образом, предполагая, что оболочка теплоизоляции образована двумя кубами с общим центром, можно определить требуемую толщину слоя теплоизоляции [2]:

$$\delta = \frac{6l^2 \cdot \lambda}{\sigma_{из} - 12^3 \sqrt{l_1 \cdot l_2 \cdot l_3} \cdot \lambda}, \quad (9)$$

Выполняя расчет по формулам (3)–(9), получаем в первом приближении $\delta = 35$ мм. Корректируя размеры кожуха, получаем во втором приближении $\delta = 34$ мм. Эта величина была использована при разработке рабочей документации (РКД) опытного образца ИП.

На этапе разработки РКД были проведены испытания макета ИП, в котором в качестве теплоизоляционного материала был использован войлок АТИМ-8 10,0, имеющий коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,04$ Вт/м·К. Корпус макета был изготовлен из листа АМц М2. АБ крепилась через втулки из текстолита непосредственно к корпусу. Войлок был уложен в четыре слоя, что дало толщину 40 мм. Воздушный зазор между АБ и слоем войлока был равен 10 мм. Испытание макета ИП на воздействие пониженной температуры минус 50 °С показало время охлаждения корпуса АБ до 0 °С не менее 2 ч что видно по рис. 3.

Расчет нестационарного теплового режима

Исходными данными для расчета нестационарного теплового режима являются : габариты кожуха ИП $(347 \times 262 \times 235)$ мм; масса ИП 12 кг ;внешние размеры теплоизоляции $(343 \times 258 \times 231)$ мм; внутренние размеры теплоизоляции $(275 \times 189 \times 140)$ мм; масса АБ $6,6$ кг; масса кожуха 4 кг; коэффициенты

теплопроводности – АБ и кожуха 117 Вт/м·К, воздуха 0,027 Вт/м·К, теплоизоляции 0,04 Вт/м·К.

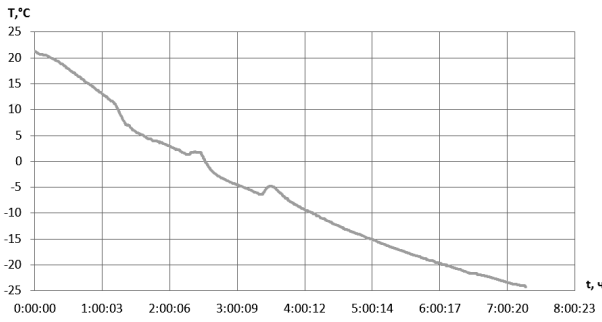


Рис. 3. График охлаждения корпуса АБ при температуре минус 50 °С

Температура АБ при помещении ИП в окружающую среду с температурой t_c изменяется в течении времени τ в соответствии с выражением [1]:

$$t_{AB} = e^{-tm} (t_1 - t_c) + t_c, \quad (10)$$

Темп охлаждения системы АБ – оболочка m вычисляется по следующим формулам[5]:

$$m = \frac{a_1 - \sqrt{a_1^2 - 4b_1}}{2},$$

$$a_1 = m_{\text{кож}} + m_{\text{АБ}}(1 + \beta),$$

$$b_1 = m_{\text{кож}} m_{\text{АБ}}, \quad (11)$$

$$\beta = C_{\text{АБ}} / (\Psi C_{\text{кож}}),$$

$$m_{\text{кож}} = \sigma_{\text{кож}} / \Psi C_{\text{кож}},$$

$$m_{\text{АБ}} = \sigma_{\text{АБ-кож}} / \Psi C_{\text{АБ}},$$

где $C_{\text{АБ}}$, $C_{\text{кож}}$ – теплоемкости АБ и кожуха; Ψ – критерий неравномерности температурного поля АБ; $\sigma_{\text{АБ-кож}}$ – тепловая проводимость от АБ к кожуху (воздушной прослойки и теплоизоляции).

Критерий неравномерности определяется по формуле:

$$\Psi = 1 / \left(\sqrt{H^2 + 1,44H + 1} \right), \quad (12)$$

$$H = \frac{\sigma K}{\lambda_{\text{АБ}} V_{\text{АБ}}},$$

где σ – тепловая проводимость определяемая по формуле (4); K – коэффициент формы АБ [2, с. 68].

Тепловая проводимость от кожуха в окружающую среду определялась для средней температуры минус 20 °С по методике [2, с.70]. При определении коэффициента конвективного теплообмена не учитывалось уменьшение перегрева ИП по отношению к среде и соответственно уменьшение критерия Грасгофа. Проводимость воздушной прослойки за счет конвекции и излучения определялась по формуле (7).

Тепловая проводимость за счет кондукции оболочки из воздуха и оболочки пенопластовой теплоизоляции определялась по формуле [3]:

$$\sigma = \frac{\lambda(L_z l_y - L_y l_z)(L_x - l_x)}{\delta_{x1} \delta_{x2} \ln(L_z l_y / (L_y l_z))} + \frac{\lambda(L_x l_z - L_z l_x)(L_y - l_y)}{\delta_{y1} \delta_{y2} \ln(L_x l_z / (L_z l_x))} + \frac{\lambda(L_y l_x - L_x l_y)(L_z - l_z)}{\delta_{z1} \delta_{z2} \ln(L_y l_x / (L_x l_y))}, \quad (9)$$

где λ – коэффициент теплопроводности материала; L_x, L_y, L_z – внешние размеры оболочки, м; l_x, l_y, l_z – внутренние размеры оболочки, м; $\delta_{x1}, \delta_{x2}, \delta_{y1}, \delta_{y2}, \delta_{z1}, \delta_{z2}$ – толщины стенок оболочки, м.

Расчеты выполнялись с помощью Mathcad. Темп охлаждения системы АБ-воздушная прослойка – теплоизоляция – кожух получился равным $3,662 \times 10^{-5} \text{ c}^{-1}$. Результат расчета по формуле (8) для температуры среды минус 30 °С представлен на рис. 4.

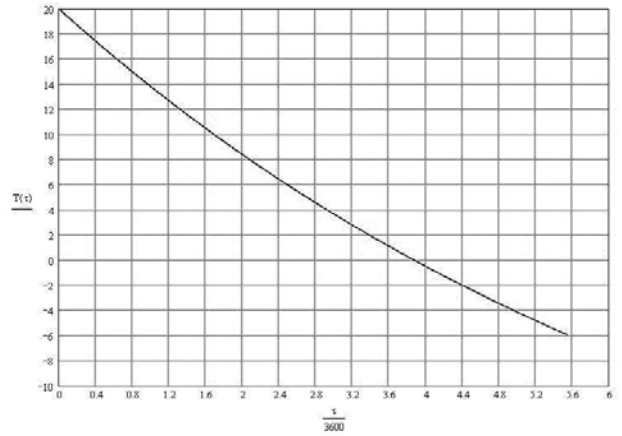


Рис. 4. Расчетное изменение температуры АБ в течении времени

Испытания на воздействие отрицательных температур

Для подтверждения требований ТЗ были проведены испытания по определению температурных кривых охлаждения ИП при воздействии отрицательных температур и определению температурной кривой отогрева ИП перед применением после воздействия отрицательной температуры.

При проведении испытаний использовалось следующее оборудование:

- термокамера МС-81Р;
- мультиметр АРРА-109N с измерительными термомпарами – 2 шт.;
- измеритель температуры и влажности Center 314.

Термомпары располагались в ИП в соответствии с рис. 5.

Результатами испытаний стали кривые охлаждения ИП при воздействии отрицательной температуры окружающей среды, показанные на рис. 6

и рис. 7, и кривая отогрева ИП после воздействия отрицательной температуры окружающей среды, представленная на рис. 8.

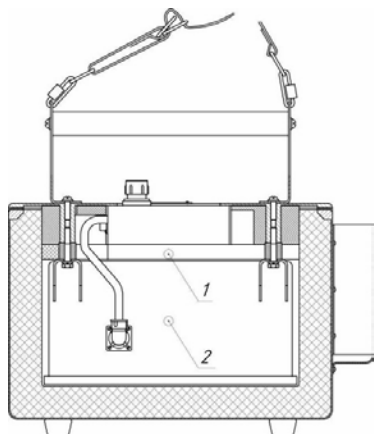


Рис. 5. Размещение измерительных термопар внутри ИП: 1 – Термопара 1 (располагается на корпусе АБ); 2 – Термопара 2 (располагается в центре АБ между аккумуляторами)

Время сохранения положительной температуры ИП при температуре окружающей среды минус 15 °С – 7 ч, при температуре окружающей среды минус 30 °С – 4 ч, при температуре окружающей среды минус 50 °С – 3 ч. Вся информация приведена в руководстве по эксплуатации на ИП. Испытания опытного образца подтвердили требования ТЗ.

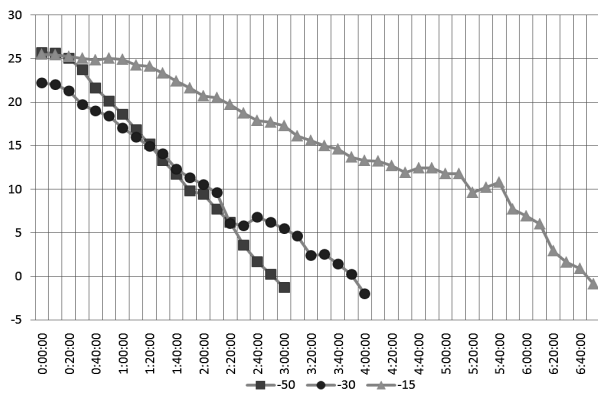


Рис. 6. График зависимости температуры в центре АБ от времени при охлаждении в режимах минус 50 °С, минус 30 °С, минус 15 °С

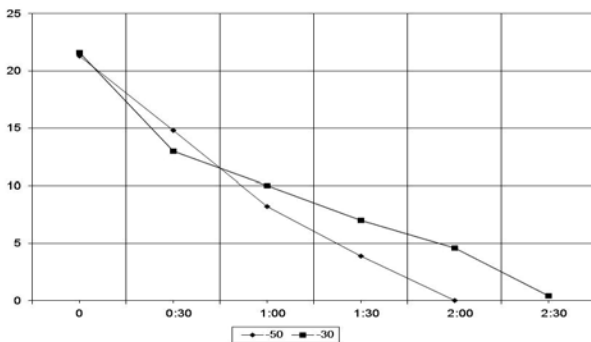


Рис. 7. График зависимости температуры корпуса АБ от времени при охлаждении в режимах минус 50 °С и минус 30 °С

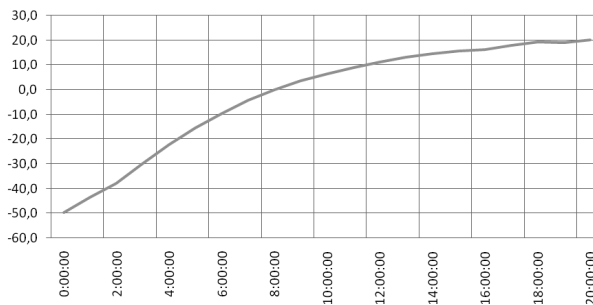


Рис. 8. График зависимости температуры в центре АБ от времени при отогреве с температуры минус 50 °С

Литература

1. Дульнев Г. Н., Теория тепло- и массообмена. – СПб.: НИУИТМО, 2012.
2. Дульнев Г. Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре. – М.: Высш. шк., 1984.
3. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент: Справочник / Под общей ред. В. А. Григорьева и В. М. Зорина. – М.: Энергоиздат, 1982.
4. Справочник конструктора РЭА: Общие принципы конструирования / Под ред. Р. Г. Варламова. – М.: Сов. Радио, 1980.
5. Кондратьев Г. М., Дульнев Г. Н. Платунов Е. С., Ярышев Н. А. Прикладная физика: Теплообмен в приборостроении. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2003.