

Тепловые режимы, термостатирование
и охлаждение радиоэлектронной аппаратуры

УДК 62-71

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ
КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ
ТЕПЛОВОЙ ТРУБЫ

Ю. Е. НИКОЛАЕНКО, М. Г. СЕМЕНА

Приведены результаты экспериментального исследования характеристик эффективной системы охлаждения теплонегруженной катушки индуктивности, каркас которой выполнен в виде диэлектрической тепловой трубы. Исследовано влияние вида рабочей жидкости тепловой трубы на добротность катушки индуктивности.

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ:

D — добротность;	γ — удельный вес;
F — частота;	ν — коэффициент кинематической вязкости;
L — индуктивность;	α — коэффициент температуропроводности;
Ω — сопротивление потерь;	g — ускорение свободного падения;
ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость;	r — скрытая теплота парообразования;
R — термическое сопротивление;	c — удельная теплоемкость;
t — температура;	Δt — разность температур;
q — плотность теплового потока;	φ — угол наклона;
α — коэффициент теплоотдачи;	Q — тепловой поток;
λ — коэффициент теплопроводности;	d — диаметр;
σ — коэффициент поверхностного натяжения;	h — высота.

Индексы: «тт» — тепловая труба, «и» — зона испарения, «к» — зона конденсации, «ст» — стенка, «с» — насыщение, «п» — подвод.

Сложные радиоэлектронные системы в ряде случаев конструктивно выполняются в виде большого количества приборных шкафов [1, 2] с размещенными внутри них радиоэлектронными блоками. Конструкция таких приборных шкафов содержит систему воздухопроводов, позволяющую обеспечить либо естественное, либо принудительное воздуш-

ное охлаждение радиоэлектронных блоков, причем в последнем случае охлаждающий воздух подается в каждый приборный шкаф из общей централизованной воздушной магистрали.

Однако в практике конструирования РЭА иногда приходится сталкиваться с тем, что использование приборного шкафа с принудительным воздушным охлаждением не позволяет обеспечить нормальный тепловой режим некоторых теплонапряженных элементов блоков (таких, например, как катушки индуктивности). Из-за ограничений на габаритные размеры и массу блоков невозможно создать необходимую поверхность охлаждения. Использование жидкостного охлаждения блочной РЭА связано с известными трудностями выполнения непротекающих гидравлических разъемов «блок—жидкостная магистраль». В связи с этим разработка и исследование эффективных систем охлаждения блочной РЭА, содержащей теплонагруженные катушки индуктивности и размещаемой в приборных шкафах, является актуальной задачей.

Одним из путей решения поставленной задачи представляется встраивание внутрь приборного шкафа охлаждаемой водой общей поверхности теплообмена (в качестве теплообменных поверхностей удобно использовать полки шкафа, прокачивая по их внутренним каналам охлаждающую воду и подавая ее в каждый приборный шкаф из общей централизованной водяной магистрали объекта установки РЭА), а передачу тепла к ней от обмоток катушки блока осуществлять с помощью диэлектрической тепловой трубы, являющейся одновременно каркасом катушки индуктивности. Зоной нагрева тепловой трубы служит ее боковая поверхность, на которой расположена обмотка катушки, а зоной конденсации — торцевая часть трубы. Катушка индуктивности располагается в блоке таким образом, чтобы зона конденсации тепловой трубы выступала над поверхностью верхнего основания блока. Блок с помощью устройства крепления [3] (или ему подобного) прижимается к расположенной выше блока охлаждаемой полке шкафа, благодаря чему достигается минимальное термическое сопротивление контакта «зона конденсации тепловой трубы—полка шкафа». Использование диэлектрической тепловой трубы в конструкции съемного блока позволяет, таким образом, осуществить эффективное охлаждение обмоток катушки индуктивности, размещенной в блоке, и избежать необходимости гидравлических разъемов «блок—жидкостная магистраль».

Для исследования характеристик такой системы охлаждения и оценки ее эффективности был изготовлен экспериментальный макет системы, схема которого показана на рис. 1. Она включает в себя каркас катушки индуктивности, выполненный в виде диэлектрической тепловой трубы, с намотанным на него спиральным нагревателем из нихромовой проволоки диаметром 0,8 мм, который служил тепловым имитатором обмотки, и холодную плиту (имитатор полки шкафа), по которой со скоростью 0,0463 м/с прокачивалась охлаждающая вода с температурой $19 \pm 0,5^\circ\text{C}$. Скорость воды в канале холодной плиты измерялась объемным методом. Массовый расход воды при поперечном сечении канала 10×72 мм составлял 0,033 кг/с (2 кг/мин).

Диэлектрическая тепловая труба представляет собой корпус в виде стакана с офитенной внутренней боковой поверхностью, закрытый сверху бронзовой крышкой. Внутренняя поверхность крышки является зоной конденсации тепловой трубы и имеет небольшой (порядка 2°) уклон от центра по радиусу для стекания конденсата на офитенную часть корпуса. Площадь поверхности конденсации $39 \cdot 10^{-4}$ м². В центре крышки запаян капилляр из нержавеющей стали для введения термпары внутрь парового канала трубы. Крышка крепится к корпусу че-

рез уплотнительную прокладку из вакуум-плотной резины с помощью восьми шпилек с резьбой М6. Все остальные элементы тепловой трубы выполнены из материалов, характеризующихся хорошими диэлектрическими свойствами и малыми диэлектрическими потерями при повышенных температурах. Корпус выполнен из алюмооксидной керамики с коэффициентом теплопроводности $\lambda = 29 \text{ Вт/(м} \cdot ^\circ\text{С)}$, фитиль — из одного слоя термообработанной кремнеземной ткани марки КТ-11 со средней пористостью 70%. Толщина слоя 0,4 мм. Фитиль плотно по всей поверхности прижат к корпусу с помощью фторопластовой вставки (вставка на рисунке не показана). В качестве рабочей жидкости использовались дистиллированная вода, ацетон и фреон 113.

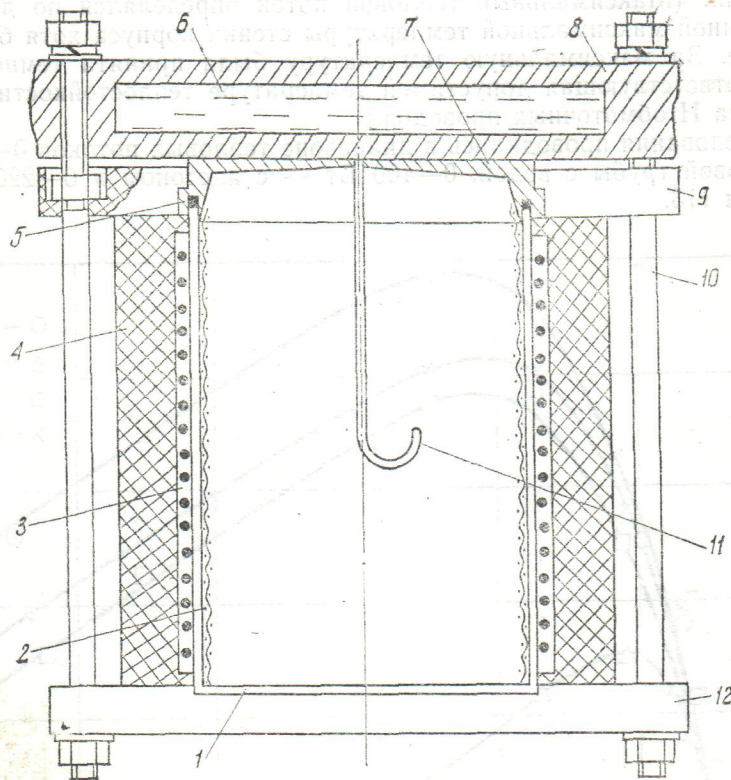


Рис. 1. Макет системы охлаждения теплонегруженной катушки индуктивности:

1 — корпус; 2 — фитиль; 3 — обмотка (имитатор обмотки); 4 — теплоизоляция; 5 — прокладка; 6 — охлаждающая вода; 7 — крышка; 8 — холодная плита; 9 — верхний фланец; 10 — шпилька; 11 — капилляр с термопарой; 12 — нижний фланец

Тепловая труба крепилась к холодной плите с помощью двух диаметрально расположенных шпилек с резьбой М6. Площадь контактной поверхности крышки $39 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$. Вся система охлаждения была закреплена на поворотном кронштейне, позволяющем осуществлять установку системы под любым углом к горизонту.

Мощность, подводимая к нагревателю, контролировалась ваттметром Д 592 класса 0,1. Распределение температур в системе охлаждения осуществлялось с помощью двадцати двух медь-константановых термо-

пар с диаметром провода 0,16 мм. (Из них по девять термопар было расположено на боковой поверхности корпуса и на наружной поверхности крышки, по одной термопаре — в паровом канале тепловой трубы и потоке воды на входе в холодную плиту и две термопары — на контактной поверхности холодной плиты.) С помощью термопар были получены температурные поля в зонах нагрева и конденсации, температура насыщения рабочей жидкости, а также разность температур в зоне контакта тепловой трубы с холодной плитой при использовании различных смазок в зоне контакта. По этим данным были определены средние коэффициенты теплоотдачи в зонах испарения и конденсации, термическое сопротивление тепловой трубы, а также максимальный передаваемый тепловой поток при различной ориентации тепловой трубы в поле гравитации. (Максимальный тепловой поток определялся по достижению заданной максимальной температуры стенки корпуса хотя бы в одной точке. За максимальную температуру была принята температура 180°C, соответствующая допустимой температуре теплостойкости изоляции класса Н обмоточных проводов.)

Исследования проводились в диапазоне тепловых потоков 0—600 Вт для тепловой трубы с водой, 0—400 Вт — с ацетоном и 0—220 Вт — с фреоном 113.

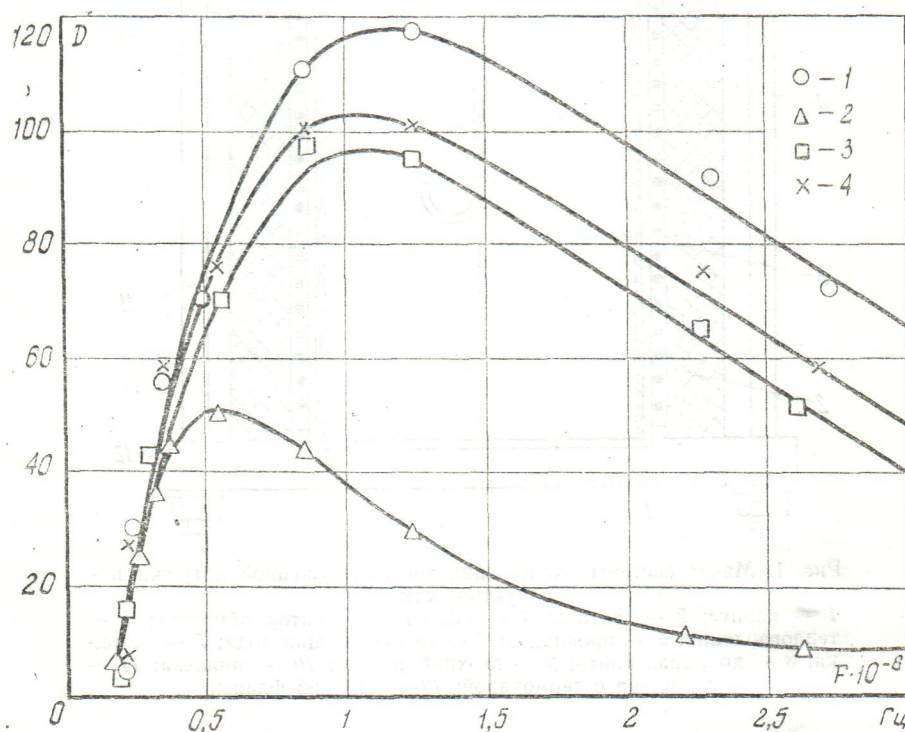


Рис. 2. Влияние рабочей жидкости на добротность катушки индуктивности в диапазоне частот $(0,2-3) \cdot 10^6$ Гц:
1 — сухой фитиль; 2 — вода ($\epsilon=80,4$); 3 — ацетон ($\epsilon=21,5$); 4 — фреон 113 ($\epsilon=2,5$)

Важнейшим электрическим параметром катушки индуктивности является ее добротность (безразмерная величина), определяемая из выражения

$$D = \frac{2 \pi f L}{\Omega} \quad (1)$$

Величина сопротивления потерь Ω определяется суммой потерь в проводе обмотки, в диэлектрике, а также в элементах конструкции прибора, расположенных в непосредственной близости от катушки.

На величину потерь в диэлектрике каркаса, а следовательно, и на добротность катушки индуктивности сильное влияние оказывают свойства рабочей жидкости, и в первую очередь — относительная диэлектрическая проницаемость жидкости. Для определения характера этого влияния вместо теплового имитатора на каркас катушки была намотана обмотка, представляющая собой 41 виток провода марки ПЭТВ 93 (диаметр провода 1,5 мм). Индуктивность обмотки $80 \cdot 10^{-6}$ Гн. Чтобы при измерении добротности учесть влияние элементов конструкции блока, катушка была помещена в термостат с металлическими стенками. Расстояние от катушки до элементов конструкции термостата составляло $(2-8) \cdot 10^{-2}$ м. Добротность измерялась прибором типа Е9-4. Результаты измерений представлены в виде графиков на рис. 2. Как видно из рисунка, при использовании в качестве рабочей жидкости теплоносителей с неплохими диэлектрическими свойствами ($\epsilon \leq 21,5$) изменение относительной диэлектрической проницаемости жидкости почти в 9 раз (фреон 113, ацетон) вызывает в диапазоне частот до $3 \cdot 10^6$ Гц незначительное изменение добротности катушки (всего в 1,0—1,3 раза). Использование же в качестве рабочей жидкости теплоносителей, обладающих большими значениями ϵ (таких как вода), значительно снижает добротность катушки индуктивности. Поэтому в ряде случаев, несмотря на хорошие теплофизические свойства, применение воды в качестве рабочей жидкости тепловой трубы для катушки индуктивности, работающей в диапазоне частот до $3 \cdot 10^6$ Гц, не представляется возможным.

Термическое сопротивление тепловой трубы определялось как сумма термических сопротивлений в зоне испарения и зоне конденсации:

$$R_{\text{тр}} = R_{\text{и}} + R_{\text{к}}, \quad (2)$$

где

$$R_{\text{и}} = \frac{\bar{t}_{\text{ст}} - t_{\text{с}}}{q_{\text{и}}}$$

$$R_{\text{к}} = \frac{t_{\text{с}} - \bar{t}_{\text{к}}}{q_{\text{к}}}$$

На рис. 3, а показана зависимость полученных таким образом термических сопротивлений от плотности подводимого теплового потока в зоне испарения для тепловой трубы с различными рабочими жидкостями при вертикальном расположении тепловой трубы (зона конденсации вверх).

Плотность подводимого теплового потока в зоне испарения $q_{\text{и}}$ определялась как отношение подводимого теплового потока $Q_{\text{и}}$ к площади внутренней боковой поверхности корпуса тепловой трубы, соприкасающейся с фитилем и составляющей $191 \cdot 10^{-4}$ м². По мере увеличения плотности теплового потока на нагревателе термическое сопротивление тепловой трубы уменьшается за счет перехода от режима испарения рабочей жидкости в фитиле к режиму кипения и интенсификации процесса конденсации насыщенного пара. Дальнейшее повышение плотности подводимого теплового потока приводит к еще большему росту ин-

тепловых свойств процесса конденсации и соответственно к росту толщины пленки конденсата на внутренней поверхности крышки. Низкая теплопроводность растущей пленки постепенно увеличивает термическое сопротивление в зоне конденсации и тепловой трубы в целом. Это влияние выражено более отчетливо в случае использования рабочей жидкости с меньшим коэффициентом теплопроводности (фреон 113).

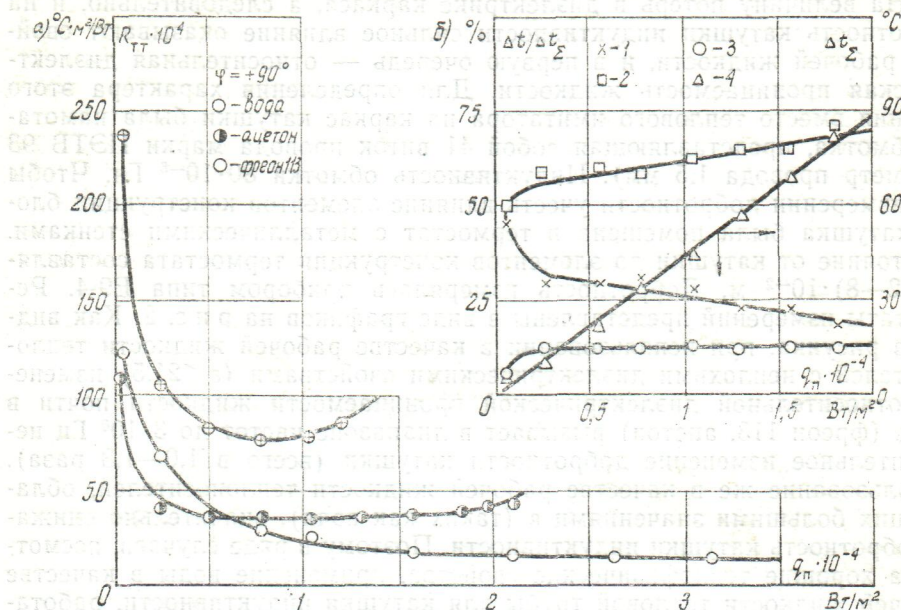


Рис. 3. Зависимость термических сопротивлений системы охлаждения от плотности подводимого теплового потока: а — общее термическое сопротивление диэлектрической тепловой трубы с различными рабочими жидкостями; б — вклад отдельных термических сопротивлений в общее термическое сопротивление системы охлаждения (рабочая жидкость — ацетон). 1 — зона испарения; 2 — зона конденсации; 3 — зона контакта «тепловая труба — холодная плита»; 4 — полный температурный напор «зона нагрева — холодная плита»

Для каждой рабочей жидкости существует свой диапазон значений q_n , при которых наблюдается минимум термического сопротивления тепловой трубы. Чем лучше теплофизические свойства рабочей жидкости, тем шире этот диапазон. Диэлектрическая тепловая труба с водой обладает наименьшим термическим сопротивлением. Однако, принимая во внимание ограниченность применения такой тепловой трубы в качестве каркаса катушки индуктивности из-за большого значения ε и учитывая высокое термическое сопротивление тепловой трубы с фреоном 113, для практического применения следует рекомендовать диэлектрическую тепловую трубу с ацетоном.

Вклад отдельных термических сопротивлений в зоне испарения и конденсации тепловой трубы, а также термического сопротивления в зоне контакта тепловой трубы с холодной плитой (при наличии в зоне контакта слоя смазки КПТ-8 толщиной 0,05—0,15 мм) в общее термическое сопротивление «зона нагрева — холодная плита» можно охарактеризовать величиной перепадов температур в каждой зоне системы охлаждения (рис. 3, б). Здесь же показана зависимость суммарного тем-

температурного напора Δt_z «зона нагрева—холодная плита» от плотности подводимого теплового потока q_n . При расчете вклада отдельных составляющих в общее термическое сопротивление системы сопротивление стенки тепловой трубы и крышки учтены в величинах R_n и R_k , соответственно. От 50 до 70% общего перепада температур приходится на термическое сопротивление в зоне конденсации, остальная часть — на термические сопротивления в зоне испарения и контакта. В зоне контакта перепад температур составил всего 6—13% общего перепада температур в системе охлаждения. Отсюда следует вывод, что для интенсификации процессов теплопередачи в системе охлаждения с диэлектрической тепловой трубой необходимо, в первую очередь, стремиться к снижению термического сопротивления в зоне конденсации тепловой трубы.

Экспериментальные данные, характеризующие зависимость $q_k = f(t_s - t_k)$, удовлетворительно описываются расчетными значениями, полученными из формулы [4, с. 47] для теплообмена при конденсации насыщенного пара на горизонтальной пластине:

$$\frac{\alpha}{\lambda} \sqrt{\frac{\sigma}{\gamma}} = 0,149 \sqrt[4]{\frac{\nu}{\alpha} \frac{g}{\nu^2} \left(\frac{\sigma}{\gamma}\right)^{\frac{3}{2}} \frac{r}{c \Delta t}} \quad (3)$$

где
$$\alpha = \frac{q_k}{t_s - t_k}; \quad \Delta t = t_s - t_k.$$

Существенное значение на эффективность теплопередачи в системе охлаждения имеет ее ориентация в поле гравитации. На рис. 4 показано влияние угла наклона тепловой трубы на максимальную температуру стенки в зоне теплоподвода. Зная ориентацию катушки в поле гравитации, по этим графикам можно легко определить допустимый подводимый тепловой поток, т. е. допустимую мощность рассеяния катушки индуктивности. Для этого исходя из класса теплоизоляции выбранного провода обмотки задаются максимальной температурой стенки тепловой трубы и по кривой, соответствующей необходимой ориентации катушки, определяют допустимый тепловой поток. Как показали результаты экспериментов, в области углов наклона $0^\circ \leq \varphi \leq +45^\circ$ ориентация катушки в поле гравитации не очень сильно влияет на величину допустимого подводимого теплового потока (изменение до 10%). За пределами этой области влияние ориентации заметно усиливается.

Из этого же рисунка видно, что температура стенки тепловой трубы зависит также от наличия и типа смазки в зоне контакта конденсаторной части тепловой трубы с холодной плитой.

Известно [5, с. 50], что температура изолированного провода определяет срок службы его изоляции. Для органических изоляционных материалов срок службы τ в зависимости от их температуры T определяется уравнением

$$\tau = N \exp \frac{b}{T},$$

где N, b — константы, определяемые системой изоляции.

Например, для системы изоляции на 180°C с повышением температуры на 12°C срок службы уменьшается в 2 раза ($N=1,29 \cdot 10^{-8}$; $b=17\,000$). Введение смазки в зону контакта тепловой трубы с холодной плитой, как правило, приводит к снижению термического сопротивления контакта, что вызывает повышение коэффициента теплопередачи

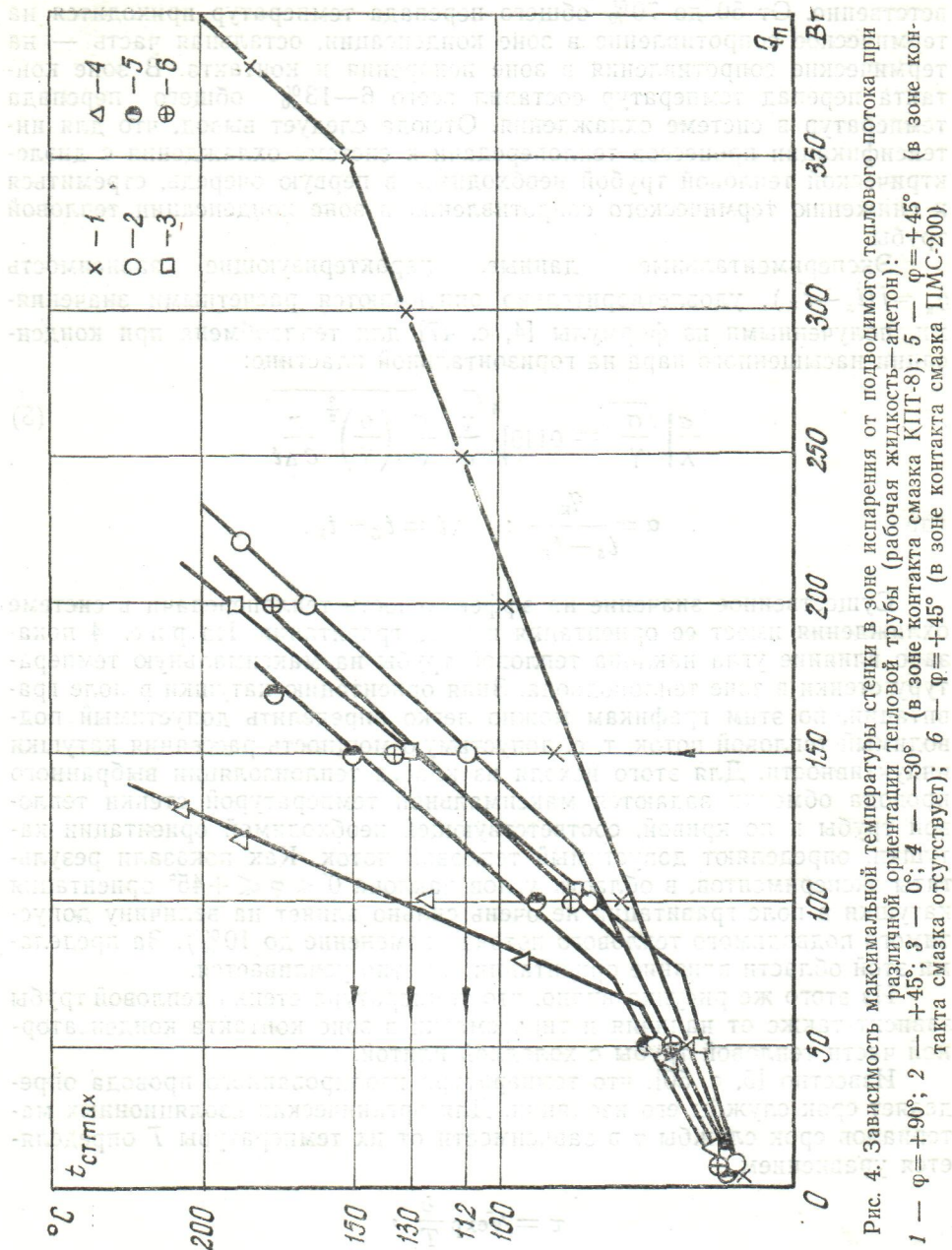


Рис. 4. Зависимость максимальной температуры стенки в зоне испарения от подводимого теплового потока при различной ориентации тепловой трубы (рабочая жидкость — ацетон): 1 — $\varphi = +90^\circ$; 2 — $+45^\circ$; 3 — 0° ; 4 — -30° ; 5 — $\varphi = +45^\circ$ (в зоне контакта смазка ПМС-200); 6 — $\varphi = +45^\circ$ (в зоне контакта смазка ПМС-200)

в системе и снижение температуры обмотки. Тем самым повышается срок службы изоляции. По графикам рис. 4 можно определить, что, например, для мощности рассеяния 150 Вт при угле наклона катушки к горизонту $+45^\circ$ и равных прочих условиях введение в зону контакта полиметилсилоксановой жидкости ПМС-200 более чем в 2 раза увеличивает срок службы изоляции провода (температура обмотки снижается на 20°C), а наличие смазки КПТ-8 — более чем в 8 раз (температура обмотки снижается на 38°C).

Для оценки эффективности предложенной системы охлаждения сравним массо-габаритные характеристики катушек индуктивности одинаковой мощности: катушки с диэлектрической тепловой трубой и обычных катушек, охлаждаемых в приборных шкафах с естественным и принудительным воздушным охлаждением. Правомерность такого сравнения вытекает из того, что габаритные размеры и масса приборного шкафа с полками, охлаждаемыми водой, и шкафов с естественным и принудительным воздушным охлаждением одинаковы, а замена общей централизованной воздушной магистрали на жидкостную со всем необходимым оборудованием (вентиляторы, насосы, теплообменники, фильтры) не приводит к увеличению ее массо-габаритных характеристик, а в некоторых случаях даже снижает их.

Конструктивные характеристики катушки индуктивности мощностью 400 Вт с различными способами охлаждения

Способ охлаждения	Габаритные размеры, м	Объем, м^3	Отношение объемов
Охлаждение катушки в шкафу с охлаждаемыми водой полками (предложенный в статье способ)	$d=0,07$ $h=0,1$	$3,8 \cdot 10^{-4}$	1
Охлаждение катушки в шкафу с естественным воздушным охлаждением при $\alpha=10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$	$d=0,3$ $h=0,3$	$21,2 \cdot 10^{-3}$	56
Охлаждение катушки в шкафу с принудительным воздушным охлаждением при $\alpha=30 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$	$d=0,17$ $h=0,17$	$3,8 \cdot 10^{-3}$	10

Некоторые конструктивные характеристики катушек индуктивности с мощностью рассеяния 400 Вт, охлаждаемых в приборных шкафах трех типов (температура воды на входе в шкаф 19°C , температура охлаждающего воздуха 35°C , температура окружающей среды 40°C , допустимая температура обмотки 180°C , расположение катушек — вертикальное), приведены в таблице. Снижение объема катушки с предложенной системой охлаждения (рабочая жидкость тепловой трубы — ацетон) по сравнению с объемом катушки эквивалентной мощности, но охлаждаемой в приборном шкафу с естественным и принудительным воздушным охлаждением (см. таблицу) — потенциальный резерв уменьшения габаритов.

ритных размеров и массы радиотехнических систем с теплонагруженными катушками индуктивности.

Таким образом, результаты экспериментального исследования показали принципиальную возможность и целесообразность создания эффективной системы охлаждения размещаемой в приборных шкафах блочной РЭА с теплонагруженными катушками индуктивности путем использования диэлектрической тепловой трубы в качестве каркаса катушки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ходорковский А. И., Моисеев А. В., Ивкин Н. Б., Гайдебуров Г. А., Антонов В. Б., Мозжухин Е. В., Колосов В. И., Морозов А. Д., Антоненко В. И., Лазарев Л. А., Зайдельсон А. М., Бережковский М. А., Яковлев В. И., Голованов М. Ф., Рыжов А. Ф., Розенберг В. М. Шкаф для размещения радиоэлектронной аппаратуры. Авт. св. СССР № 437260. — Бюллетень «Открытия, изобретения, промышленные образцы, товарные знаки», 1974, № 27.
2. ОСТ 5.8244-72 «Шкафы для изделий приборостроения», 1972.
3. Антоненко В. И., Барабаш М. Б., Голиков А. Д., Львов Л. А., Моисеев А. В., Новицкая Т. И., Петров А. А., Родионова В. И., Ходорковский А. И., Янковский В. Н. Устройство для крепления радиоэлектронных блоков. Авт. св. СССР № 470942. — Бюллетень «Открытия, изобретения, промышленные образцы, товарные знаки», 1975, № 18.
4. Кутателадзе С. С. Теплоотдача при конденсации и кипении. М.-Л., Машгиз, 1952.
5. Каретникова Е. И., Рычина Т. А., Ермаков А. И. Трансформаторы питания и дроссели фильтров для РЭА. М., «Сов. радио», 1973.

*Статья поступила в редакцию в январе 1978 г.,
после доработки — в июне 1978 г.*