

## П3.2. Рекомендации по применению сердечников из магнитомягких ферритов

### П3.2.1. Общие указания по применению сердечников

При разработке элементов радиоэлектронной аппаратуры, содержащих ферритовые сердечники, необходимо учитывать следующее:

1. Выборке конкретного ферритового сердечника той или иной марки для проектируемого элемента радиоэлектронной аппаратуры должно предшествовать тщательное ознакомление с техническими условиями, нормами, стандартами (ГОСТ 16541—71) и другими техническими документами на ферритовые сердечники с учетом всех энергетических, климатических и механических воздействий, которым они могут подвергаться в процессе эксплуатации. В случаях, не подтвержденных техническими документами, ферритовые сердечники допустимо применять только после проведения дополнительных испытаний и разрешения организации, утвердившей соответствующий документ.

2. При настройке, эксплуатации и последующем длительном хранении аппаратуры, содержащей ферритовые сердечники, необходимо учитывать присутствующие этим ферритам процессы аккомодации и дезаккомодации начальной магнитной проницаемости.

3. В процессе эксплуатации недопустим нагрев ферритовых сердечников выше точки Кюри.

4. При учете влияния различных внешних факторов на ферритовые сердечники следует учитывать не только усредненные численные значения параметров, полученных в результате воздействия этих факторов, но и предельно возможные. Кроме того, необходимо учитывать изменение параметров в течение срока хранения и эксплуатации в конструкциях. Поэтому аппаратура должна быть сконструирована так, чтобы изменение параметров ферритовых сердечников в пределах норм, установленных техническим документом, не отражалось на работоспособности аппаратуры в процессе ее эксплуатации.

5. При необратимых изменениях начальной магнитной проницаемости, например в результате механической обработки, допустимо «омоложение» магнитной структуры ферритовых сердечников. Для сердечников из ферритов никель-цинковой системы «омоложение» достигается медленным нагревом их до температуры, превышающей точку Кюри на  $10...20^\circ$ , и затем медленным охлаждением до комнатной температуры. Для сердечников из ферритов марганец-цинковой системы «омоложение» магнитной структуры достигается перемагничиванием их в переменном электромагнитном поле, амплитуда которого превышает поле насыщения в 2 раза.

На стабильность магнитной проницаемости сердечника оказывают влияние различные внешние факторы и условия эксплуатации: температура и смена температур; электромагнитные поля; повышенная влажность; механические напряжения; процесс хранения.

### П3.2.2. Воздействие температуры окружающей среды

Температура окружающей среды является важнейшим фактором, влияющим на стабильность параметров ферритовых сердечников. Основным источником тепла во многих случаях являются радиодетали и сборочные единицы, выделяющие тепло в результате выполнения своих функций. Поэтому при конструировании радиоэлектронной аппаратуры следует размещать ферритовые сердечники по возможности дальше от тепловыделяющих элементов схемы или создавать условия с принудительным отводом тепла.

При изменении температуры окружающей среды изменение начальной магнитной проницаемости происходит пропорционально температурному коэффициенту начальной магнитной проницаемости:

$$\Delta\mu/\mu_H = \mu_H \alpha_\mu \Delta T.$$

где  $\Delta\mu/\mu_H$  — относительное изменение начальной магнитной проницаемости, %;  $\alpha_\mu$  — относительный температурный коэффициент начальной магнитной проницаемости;  $\Delta T$  — изменение температуры,  $^\circ\text{C}$ .

Зависимости изменения начальной магнитной проницаемости ферритов от температуры окружающей среды были показаны в гл. 1. Там же, в таблицах, приведены значения относительного температурного коэффициента начальной магнитной проницаемости для ферритов в различных интервалах температур.

Длительное воздействие положительных температур на ферриты марганец-цинковой системы приводит к необратимому изменению  $\mu_H$ . Относительное изменение этой величины в зависимости от времени воздействия положительной температуры описывается аналитическим выражением

$$\Delta\mu/\mu_H = -\alpha(b + uT^2)(t \cdot 10^{-3})^x,$$

где  $\alpha$  — коэффициент, зависящий от условий хранения сердечника до начала его испытаний и от технологии производства (см. табл. ПЗ.2.1);  $b$ ,  $u$ ,  $x$  — коэффициенты (см. табл. ПЗ.2.1).

ТАБЛИЦА ПЗ.2.1

Марка феррита	Коэффициенты			
	$\alpha^1$	$x$	$b$	$u$
700НМ	1,0	0,403 1	0,739 6	0,000 46
1000НМ3	1,2	0,360 5	1,039 0	0,001 00
1500НМ3	0,9	0,398 7	3,511 0	0,000 70
2000НМ1	0,9	0,381 9	1,554 0	0,000 99
2000НМ3	1,0	0,346 2	0,921,7	0,000 26
3000НМ	1,0	0,325 4	1,617 0	0,000 14
4000НМ	1,0	0,368 3	2,619 2	0,000 37
6000НМ	1,0	—	—	—

<sup>1</sup> Значение  $\alpha$  определено для ферритов, остаренных в условиях отапливаемого склада в течение 6 месяцев.

Если для данной технологической партии необходимо определить значение  $\Delta\mu/\mu_H$  более точно, то рекомендуется провести предварительные испытания в течение 500 ч при любой температуре, меньшей температуры точки Кюри, с целью уточнения коэффициента  $\alpha$ . По результатам испытаний коэффициент  $\alpha$  подсчитывается по формуле

$$\alpha = \frac{\Delta\mu/\mu_H}{(b + uT^2)(500 \cdot 10^{-3})^x}$$

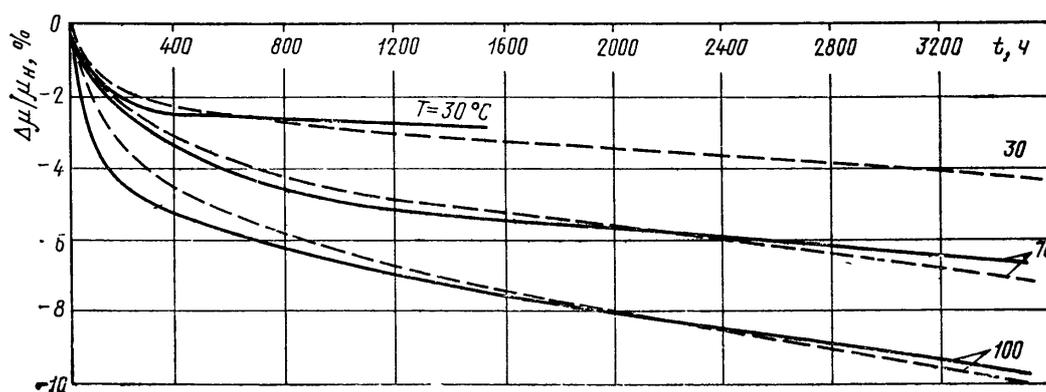


Рис. ПЗ.2.1. Экспериментальная (—) и теоретическая (---) зависимости относительной начальной магнитной проницаемости феррита марки 4000НМ от времени воздействия температур

С помощью аналитических выражений с достаточной для практики точностью можно определить  $\Delta\mu/\mu_H$  в широком интервале температур: от  $+30^\circ\text{C}$  до предельной рабочей температуры.

В качестве примера на рис. ПЗ.2.1 показаны зависимости  $\Delta\mu/\mu_H$  от времени воздействия температуры для феррита марки 4000НМ, полученные экспериментально и рассчитанные по формулам.

Из рисунка видно, что распределение относительного изменения начальной магнитной проницаемости в партии ферритов подчиняется нормальному закону, параметры которого стабилизируются после 500 ч воздействия повышенной температуры.

Суммарное изменение начальной магнитной проницаемости при изменении температуры и в зависимости от времени ее воздействия

$$\Delta\mu/\mu_H = \mu_H \alpha_\mu \Delta T + \alpha (b + uT^2) (t \cdot 10^{-3})^x.$$

Величина изменения магнитной проницаемости у сердечников сложной конфигурации с учетом размагничивающего фактора

$$\frac{\Delta\mu}{\mu_e} = \frac{\mu_e}{\mu_H} \left( \frac{\Delta\mu}{\mu_H} \right) = \frac{\mu_e}{\mu_H} [\mu_H \alpha_\mu \Delta T + \alpha (b + uT^2) (t \cdot 10^{-3})^x],$$

где  $\mu_e$  — эффективная магнитная проницаемость.

Длительное воздействие отрицательных температур на ферриты марганец-цинковой системы не вызывает необратимых изменений начальной магнитной проницаемости. Для ферритов никель-цинковой системы длительное воздействие положительных температур не вызывает существенных необратимых изменений начальной магнитной проницаемости.

### П3.2.3. Воздействие смены температур

При кратковременном воздействии температуры окружающей среды наряду с изменением магнитной проницаемости наблюдается необратимое (остаточное) изменение, связанное с существованием эффекта температурного гистерезиса магнитной проницаемости.

При эксплуатации ферритовых сердечников имеют место три вида воздействия смены температур:

положительный цикл — нагрев от нормальной температуры  $T_H$  до максимальной положительной температуры  $T_{(+)\max}$  с последующим охлаждением до  $T_H$  (цикл А);

отрицательный цикл — охлаждение от  $T_H$  до максимальной отрицательной температуры  $T_{(-)\max}$  с последующим нагревом (цикл Б);

последовательное чередование циклов А и Б (например, А, Б, А<sub>2</sub>, Б<sub>2</sub>...).

Смена температур по-разному влияет на марганец-цинковые и никель-цинковые ферриты.

Влияние смены температур на сердечники из марганец-цинковых ферритов. Необратимое изменение  $\mu_H$  вызывается только циклом А, при этом  $\mu_H$  возрастает. Цикл Б необратимого изменения  $\mu_H$  практически не вызывает, поэтому чередование циклов А и Б сводится к воздействию цикла А.

Необратимое увеличение  $\mu_H$  после цикла А будет тем больше, чем больше она снизилась вследствие временного старения с момента изготовления ферритов до момента воздействия цикла. Цикл А как бы «омолаживает» феррит. Таким образом, чувствительность к циклам зависит от временной нестабильности ферритов. Ферриты с большой временной стабильностью (2000НМЗ, 3000НМ, 4000НМ, 6000НМ, 6000НМ1, 1000НМ) практически не чувствительны к воздействию температурных циклов.

Максимальное изменение  $\mu_H$  после воздействия цикла не будет превышать значения его предварительного снижения вследствие временного старения. Воздействие циклов А на свежизготовленные («молодые») сердечники не вызывает необратимого роста  $\mu_H$  и может вызвать только ее снижение вследствие температурного старения за время воздействия цикла. К необратимому изменению  $\mu_H$  приводит только цикл А с  $T_{(+)\max}$ , большей, чем температура, при которой происходит временное старение сердечника. Необратимое изменение  $\mu_H$  после цикла А тем больше, чем выше  $T_{(+)\max}$ .

Если температурные циклы следуют непосредственно друг за другом, то наибольшее необратимое изменение  $\mu_H$  наблюдается после первого цикла. Последующие циклы мало изменяют  $\mu_H$ : ее уменьшение может наблюдаться после повторных циклов вследствие ускоренного старения при повышенных температурах.

После увеличения  $\mu_n$  в результате температурного цикла наблюдается ее временной спад в результате старения, а повторный температурный цикл снова увеличивает  $\mu_n$ .

Изменение  $\mu_n$  после повторного температурного цикла зависит от значения временного спада  $\mu_n$  после первого температурного цикла и увеличивается с увеличением времени между первым и вторым циклами. Необратимое изменение  $\mu_n$  после цикла А зависит от скорости охлаждения, увеличиваясь с ее увеличением. Скорость нагрева не оказывает существенного влияния на изменение  $\mu_n$ .

Для повышения стабильности сердечников при воздействии смены температур рекомендуется предварительно их «остаривать» при температуре, равной или выше максимальной температуры эксплуатации, транспортирования и хранения.

**Влияние смены температур на сердечники из никель-цинковых ферритов.** У сердечников, не подвергшихся случайным воздействиям (ударам, размагничиванию, охлаждению и т. п.), циклы А практически не вызывают необратимых изменений  $\mu_n$ , а циклы Б вызывают ее необратимый спад.

ТАБЛИЦА ПЗ.2.2

Марка феррита	Необратимое изменение $\mu_n$ , %
2000НН	8...10
1000НН	5...8
600НН	4...6
400НН	2...3

Максимальное снижение проницаемости после воздействия цикла Б наблюдается у свежеприготовленных образцов или у образцов, «омоложенных» нагреванием до точки Кюри с последующим охлаждением до комнатной температуры. Это снижение тем больше, чем ниже  $T_{(-)max}$ . Ориентировочное значение максимального снижения начальной магнитной проницаемости после цикла Б с  $T_{(-)max} = -60^\circ\text{C}$  приведено в табл. ПЗ.2.2.

Если магнитопроводы подвергались воздействиям (механические удары, намагничивание, предварительные циклы Б), приводящим к необратимому изменению  $\mu_n$ , то значение ее необратимого изменения после воздействия цикла Б уменьшается, а после воздействия цикла А увеличивается по сравнению с величиной необратимого изменения проницаемости образцов, не подвергавшихся этим воздействиям. Таким образом, стабильность ферритов к воздействию циклов Б повышается, а к воздействию циклов А — уменьшается.

При последовательном воздействии одноименных циклов  $A_1, A_2, A_3$  (или  $B_1, B_2, B_3$ ) основной вклад в необратимое изменение вносит первый цикл. При воздействии чередующихся циклов А и Б (например,  $A_1B_1, A_2B_2$  и т. д.) цикл А, следуя за циклом Б, стремится вернуть значение  $\mu_n$  к исходному, а последующий цикл Б снова уменьшает  $\mu_n$ . Значение необратимого изменения  $\mu_n$  после температурных циклов не зависит от скорости изменения температуры.

Для погашения нестабильности никель-цинковых ферритов к воздействию смены температур рекомендуется предварительно воздействовать циклами Б с  $T_{(-)max}$ , равной максимальной отрицательной температуре при эксплуатации, транспортировании и хранении.

#### ПЗ.2.4. Длительное воздействие электромагнитных полей при положительных температурах

Одновременное воздействие электромагнитного поля и температуры является наиболее вероятным режимом эксплуатации ферритового сердечника, при котором наблюдается необратимое изменение параметров ферритов во времени.

На рис. ПЗ.2.2 приведены кривые, характеризующие относительное изменение магнитной проницаемости кольцевых марганец-цинковых ферритовых сердечников при одновременном воздействии электромагнитных полей частотой 1 кГц и повышенных температур. Изменение магнитной проницаемости под влиянием воздействия магнитных полей различной частоты в пределах 1...100 кГц практически не зависит от частоты. Из приведенных кривых видно, что электромагнитное поле и положительная температура оказывают различное по знаку влияние на изменение магнитной проницаемости.