

Владимир Савишкин (КОМПЭЛ)

## КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ IHLP: ФИЛЬТРАЦИЯ ПОМЕХ И ЭНЕРГИЯ ДЛЯ ВЧ DC/DC



Благодаря таким преимуществам катушек индуктивности серии **IHLP** от **Vishay**, как низкое активное сопротивление и способность работать с большими токами, они являются отличным выбором для использования в **DC/DC-преобразователях** и **ЭМП-фильтрах**.

Статья написана на основе оригинального материала компании **Vishay**.

Производители стараются уменьшить размер, увеличить частоту переключений и мощность DC/DC-преобразователей. Сложные условия работы (в особенности это касается автомобильной электроники) и весьма строгий контроль качества бросят серьезный вызов разработчикам устройств.

Современные требования подразумевают все большее использование электроники при уменьшении пригодного для ее размещения пространства. Именно для таких случаев и разработаны малоразмерные, предназначенные для поверхностного монтажа, полностью защищенные катушки индуктивности серии **IHLP** производства компании **Vishay**. Эта серия была создана для решения двух основных задач – фильтрации электромагнитных помех в сетях большой мощности и накопления энергии для высокочастотных DC/DC-преобразователей.

Для соответствия заданным в современных компьютерах типоразмерам разработчикам необходимы высоковольтные катушки индуктивности, минимальные по размерам и полностью защищенные. Катушки серии **IHLP** от **Vishay** отвечают этим требованиям. На рынке автомобильной электроники они широко используются с 2002 года.

### Устройство IHLP

Катушка **IHLP** собрана из медной обмотки и выводной рамки, соединенных методом ультразвуковой сварки (рис. 1). Окончательную форму катушке придает опрессованный корпус из эпоксидного наполнителя с металлическим порошком.

Медная обмотка внутри катушки, покрытая лаком и изоляцией, выдерживает рабочую температуру до 200°C.

Использованные порошковые материалы позволяют катушке стабильно работать на высоких нагрузках при температуре до 125°C. Данная темпера-

тура определяется как температура саморазогрева катушки плюс температура окружающей среды. В настоящее время катушки серии **IHLP** могут стабильно работать при температуре до 125°C и соответствуют стандарту AEC-Q200. Они могут эксплуатироваться и при большей температуре, впрочем, в данном случае необходимо принимать во внимание эффект теплового старения (см. ниже). В настоящее время **Vishay** разрабатывает материал, способный выдерживать рабочую температуру в 155°C без эффекта старения.

### Фильтрация электромагнитных помех (ЭМП)

ЭМП-фильтр предназначен для уменьшения воздействия электромагнитных помех, создаваемых силовыми цепями. Этот элемент особенно важен в автомобилях, так как электромагнитное излучение (ЭМИ) может негативно сказаться на работе многих схем. Для разработчиков ЭМП-фильтров важны такие характеристики, как потеря мощности сигнала, падение напряжения, вносимые потери и количество необходимых каскадов. Преимуществом **IHLP** является низкое для таких размеров активное сопротивление, так как все проблемы, связанные с фильтрацией ЭМП, в той или иной форме зависят именно от него. При применении многокаскадных фильтров снижение падения напряжения в каскадах будет складываться.

Ключевыми требованиями в автомобильной электронике являются избавление от (или существенное снижение) ЭМП, ЭМИ и их негативного влияния на электрические цепи без заметных потерь напряжения. Провода, по которым передается ток между электронными узлами управления, имеют достаточную длину, так что вопрос падения напряжения встает достаточно остро. ЭМП-фильтр и кабель с суммарным сопротивлением 200 мОм при токе в 10 А дадут падение напряжения в 2 В.

### DC/DC-преобразователи

Основное применение катушки индуктивности, выполненные по технологии **IHLP**, находят в неизолированных

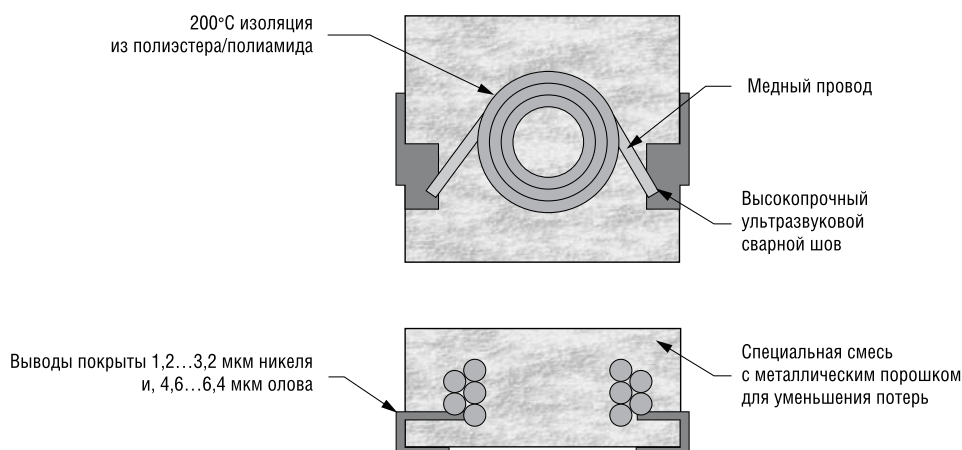


Рис. 1. Устройство катушки **IHLP**

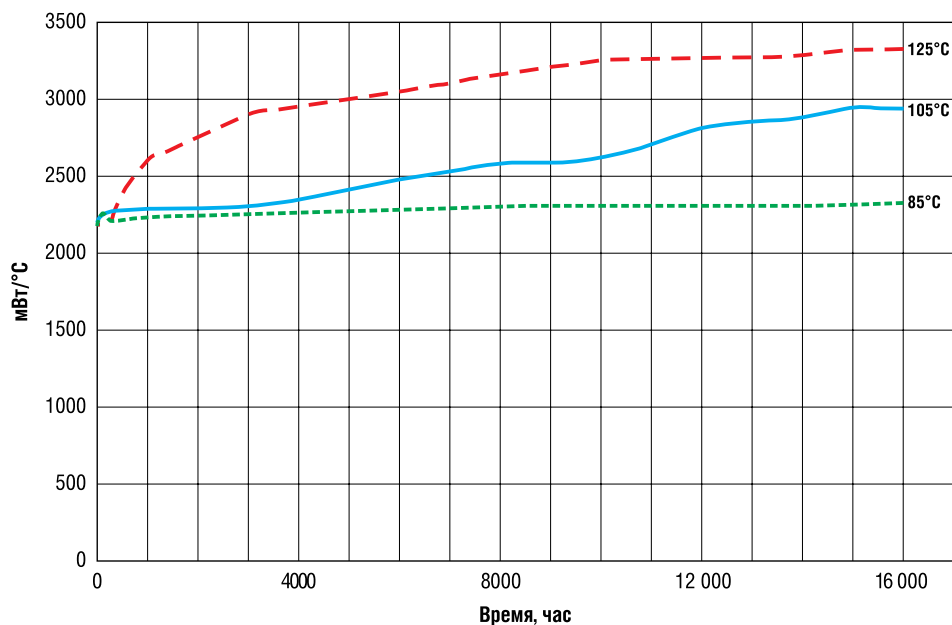


Рис. 2. График зависимости потерь в сердечнике от часов работы при различных рабочих температурах

DC/DC-преобразователях. Для современных и перспективных источников питания двумя определяющими факторами являются максимальное значение напряжения питания и минимальный размер. Для достижения поставленных целей разработчики должны повышать рабочую частоту, что позволит использовать компоненты меньшего размера, однако обратной стороной медали является увеличение потерь.

DC/DC-преобразователи также должны работать при постоянно увеличивающейся температуре окружающей среды. При таких условиях повышается собственная температура катушки индуктивности, дополнительно разогреваемой ввиду тепловых потерь на ней. Известно, что признаком теплового старения катушек с металлическим порош-

ком при повышении рабочих температур является эффект потерь в сердечнике. Эти потери должны быть приняты во внимание во время проектирования схем с использованием композитных катушек для рабочих температур, превышающих 125°C. Эффект теплового старения может быть минимизирован простым ограничением верхней планки рабочих температур до 125°C. Это не означает, что катушки перестанут работать при большей температуре, однако в этом случае разработчикам придется более тщательно подходить к созданию схем.

### Тепловое старение

По результатам исследований Vishay тепловое старение, выраженное в форме потерь в сердечнике, возникает при температурах свыше 125°C и определя-

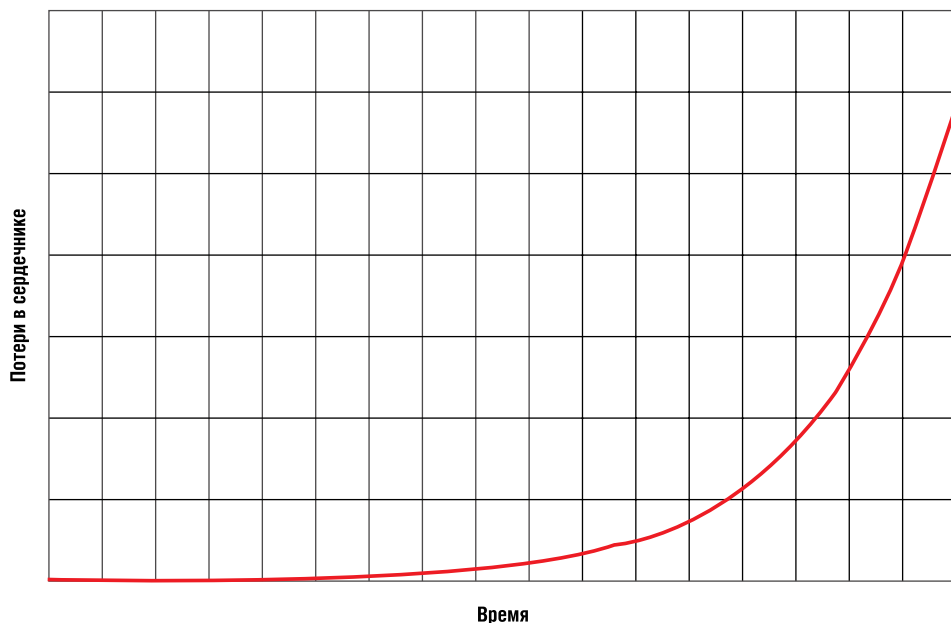


Рис. 3. График зависимости потерь в сердечнике от времени

ется как функция времени и температуры. Чем сильнее температура превышает 125°C, тем быстрее потери в сердечнике достигают определенного уровня. Эффект старения обусловлен тем, что изоляция между металлическими частицами начинает проводить ток. Исследования показали, что катушка без корпуса и изоляции имеет примерно такое же сопротивление, как и катушка с композитным корпусом, подверженная тепловому старению. Продукция IHLP демонстрирует плато величины потерь в сердечнике (рис. 2) между 2500 и 9000 часами работы при повышенных температурах. Чем больше рабочая температура, тем быстрее достигается это плато.

Подтверждено, что изолирующий слой между частицами металла при повышении температуры вступает в реакцию с кислородом, снижая свое сопротивление, что в результате приводит к повышению индукционных токов и неоправданно высоким потерям в сердечнике.

После того как все покрытие вступило в реакцию, темпы увеличения проводимости снижаются, что приводит к появлению плато на кривой старения, как показано на рис. 2.

На рисунке 3 показан тепловой пробой, в случае возникновения которого потери в сердечнике окажут самое серьезное влияние на всю схему целиком. Vishay рекомендует следить за тем, чтобы величина потерь в сердечнике не превышала приблизительно трети от общих потерь, а также чтобы сумма температуры окружающей среды и температуры катушки, повышающаяся из-за них, не превышала 125°C. Если необходимо, чтобы катушка работала при больших температурах, значение потерь в сердечнике должно быть в пределах одной шестой от общих потерь для уменьшения эффекта теплового старения. Vishay предполагает, что общее повышение температуры катушки, связанное со всеми факторами (потери в сердечнике, тепловые потери, наведенные потери, поверхностный эффект), составит 40°C или менее вне зависимости от температуры окружающей среды. Если потери в сердечнике составляют лишь малую часть от общих потерь в катушке, повышение первых в связи с тепловым старением незначительно скажется на окончательной температуре катушки. Для определения потерь в сердечнике вы можете воспользоваться документом Vishay №34250, Selecting IHLP Composite Inductors for Non-Isolated Converters Utilizing Vishay's Application Sheet.

Как отмечалось ранее, тепловой пробой случится при следующих условиях: если потери в сердечнике превосходят все остальные, и если импеданс катушки является ограничителем тока через

Таблица 1. Рекомендованные соотношения размеров внешних дорожек и их проводимости на основе повышения температуры

Повышение температуры	30°C			40°C			50°C			60°C			70°C		
	Толщина дорожки, мм	0,0175	0,035	0,07	0,0175	0,035	0,07	0,0175	0,035	0,07	0,0175	0,035	0,07	0,0175	0,035
Ширина дорожки, мм	Максимальный ток, А														
0,250	0,6	0,8	1,2	0,7	0,9	1,4	0,7	1,0	1,5	0,8	1,1	1,6	0,8	1,2	1,8
0,500	1,0	1,4	2,1	1,0	1,6	2,4	1,3	1,8	2,6	1,4	2,0	2,8	1,5	2,1	3,0
0,750	1,4	2,0	2,9	1,6	2,3	3,3	1,7	2,5	3,6	1,9	2,7	3,9	2,0	2,9	4,2
1,000	1,7	2,5	3,6	2,0	2,8	4,1	2,2	3,1	4,5	2,4	3,4	4,9	2,5	3,6	5,3
1,250	2,1	3,0	4,3	2,3	3,0	4,9	2,6	3,7	5,4	2,8	4,1	5,9	3,0	4,4	6,3
1,500	2,4	3,4	5,0	2,7	3,9	5,6	3,0	4,3	6,2	3,2	4,7	6,8	3,5	5,0	7,3
1,750	2,7	3,9	5,6	3,1	4,4	6,4	3,4	4,9	7,0	3,7	5,3	7,6	3,9	5,7	8,2
2,000	3,0	4,3	6,2	3,0	4,9	7,1	3,8	5,4	7,8	4,1	5,9	8,5	4,4	6,3	9,1
2,250	3,3	4,7	6,8	3,7	5,4	7,8	4,1	6,0	8,6	4,5	6,5	9,3	4,8	6,9	10,0
2,500	3,6	5,1	7,4	4,1	5,9	8,4	4,5	6,5	9,3	4,9	7,0	10,1	5,2	7,5	10,9
2,750	3,8	5,5	8,0	4,4	6,3	9,1	4,8	7,0	10,1	5,2	7,6	10,9	5,6	8,1	11,7
3,000	4,1	5,9	8,6	4,7	6,8	9,8	5,2	7,5	10,8	5,6	8,1	11,7	6,0	8,7	12,5
3,250	4,4	6,3	9,1	5,0	7,2	10,4	5,5	8,0	11,5	6,0	8,6	12,5	6,4	9,3	13,4
3,500	4,6	6,7	9,7	5,3	7,6	11,0	5,8	8,4	12,2	6,3	9,2	13,2	6,8	9,8	14,2
3,750	4,9	7,2	10,2	5,6	8,1	11,6	6,2	8,9	12,9	6,7	9,7	14,0	7,2	10,4	15,0
4,000	5,2	7,5	10,8	5,9	8,5	12,2	6,5	9,4	13,5	7,0	10,2	14,7	7,6	10,9	15,8
4,250	5,4	7,8	11,3	6,2	8,9	12,8	6,8	9,8	14,2	7,4	10,7	15,4	7,9	11,4	16,5
4,500	5,7	8,2	11,8	6,4	9,3	13,4	7,2	10,3	14,9	7,7	11,2	16,1	8,3	12,0	17,3
4,750	5,9	8,5	12,3	6,7	4,1	14,0	7,4	10,7	15,5	8,5	11,7	16,8	8,7	12,5	18,0
5,000	6,2	8,9	12,8	7,0	10,1	14,6	7,7	11,2	16,1	8,4	12,1	15,5	9,0	13,0	18,8

**Примечание:** Для внутренних дорожек величина тока уменьшается на 50%

нее. При увеличении потерь в сердечнике эффективная индуктивность и энергия магнитного поля катушки (1/2LI<sup>2</sup>) уменьшаются. Вероятность возникновения теплового пробоя повышается, если ширина импульса преобразователя увеличивается, чтобы компенсировать возросшую нагрузку. Это приводит к увеличению тока через катушку. Чем больше ток, тем выше температура, и так до тех пор, пока не произойдет тепловой пробой.

Тем не менее, если в схеме предусмотрено ограничение тока переключающим транзистором, регулятор отключится, и тепловой пробой не произойдет. Энергия магнитного поля на катушке будет невелика в связи с эффектом теплового старения, но перегрева не произойдет, если величина тока будет ограничена. Помимо этого, потери в материале, содержащем металлический порошок, не могут увеличиваться по экспоненте бесконечно, как предполагает график. Рост потерь остановится в тот момент, когда магнитные характеристики материала уже не будут зависеть от температуры.

### К вопросу о печатных платах

В 1956 году Национальное бюро стандартов предприняло попытку определить токопроводящую способность дорожек печатных плат (PCB). Попытка окончилась неудачей в связи с неспособностью точно рассчитать изменение температуры этих дорожек. Далее последовали документ MILSTD-275 1973 года и измененный в 1999 году

IPC-2221, они также окончательно не определили стандарт дорожек печатных плат. В этих документах определяется токопроводимость дорожек, тогда как случаи поверхностного монтажа элементов, использующих дорожки в качестве радиаторов, не рассматриваются.

Чтобы соответствовать требованиям современного рынка, разработчики постоянно должны создавать все более дешевые и меньшие по размерам мощные источники питания. Для достижения этой цели конструкторы зачастую уменьшают толщину и/или ширину дорожек печатных плат. В результате это оканчивается перегревом и снижением эффективности, а навесные элементы, в данном случае катушки индуктивности, использующие дорожки в качестве радиаторов, вносят свой вклад в общие потери.

Каждый производитель силовых катушек индуктивности предоставляет рассчитанную заранее величину тока для каждой катушки. Эти расчеты обычно основываются на увеличении температуры или достижении режима насыщения. Во многих случаях увеличение температуры является главным фактором для расчетов величины силы тока. Чаще всего расчетный ток — это величина постоянного тока, приводящая к увеличению температуры катушки на 40°C из-за активного сопротивления катушки и сопротивления материала обмотки. Эта расчетная величина не принимает во внимание нагрев из-за потерь в сердечнике, что является темой для отдельного разговора.

Тем не менее при использовании величины расчетного тока подразумевается, что выводы деталей и дорожки печатных плат способны выдержать проводимый ток и рассеять тепло, выделяемое обмоткой. Многие разработчики не принимают во внимание тот факт, что количества меди в обмотке, призванной справляться с достаточно большими токами в катушке, достаточно, чтобы повышением своей температуры вывести катушку в тепловой режим, не предусмотренный документацией производителя. Несмотря на то, что количество факторов, определяющих способность дорожек печатных плат проводить тепло, достаточно велико, были сформулированы основные требования к размерам дорожек, предназначенных для проведения больших токов.

Таблица 1 сводит воедино рекомендуемые максимальные токи для дорожек указанных размеров. Расчеты были выполнены по формуле:

$$I = 3,188 \times \Delta T^{0,45} \times W^{0,79} \times Th^{0,53},$$

где повышение температуры измеряется в 40°C; ширина и толщина дорожек в мм; 3,188 — константа, взятая из общей термодинамической модели и переведенная в единицы СИ. При выполнении этих рекомендаций разработчик может рассчитывать на температуры, близкие к описанным в документации по продукции IHLP.

**Получение технической информации, заказ образцов, поставка — e-mail: [discret.vesti@compel.ru](mailto:discret.vesti@compel.ru)**