

Б. Б. Утегулов, И. В. Захаров, А. Д. Ижикова

ПЕРСПЕКТИВА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В ИНДУКТОРАХ С САМОКОМПЕНСАЦИЕЙ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Проведен анализ электрофизических свойств диэлектрических материалов, перспективных для использования в конструкциях индукторов с самокомпенсацией реактивной мощности. Показана возможность применения материалов в условиях низкотемпературного охлаждения.

Электрическая изоляция криорезистивного индуктора с самокомпенсацией реактивной мощности [1] работает в условиях резко отличающихся от нормальных, что связано с низкотемпературным охлаждением его обмотки (от 25 до 77 К). Поэтому важнейшей проблемой при проектировании электроизоляционной конструкции для таких индукторов является обеспечение механической и электрической прочности в условиях многократного глубокого охлаждения и тепловых ударов при различных коэффициентах термической усадки металла и электрической изоляции.

Оптимизация конструкции криорезистивного индуктора с самокомпенсацией [2] показала, что перспективными диэлектрическими материалами для использования в нем могут быть полимеры.

Основными характеристиками, определяющими электрические свойства диэлектриков при низких температурах, являются тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$, диэлектрическая проницаемость ϵ и электрическая прочность $E_{\text{пр}}$.

Наиболее детально при низких температурах были изучены диэлектрические свойства полиэтилена. Тангенс угла диэлектрических потерь измерен в промышленных образцах полиэтилена на частоте 75 Гц (Allan R. N., Kuffel E., 1968). Отмечен четко выраженный максимум при 150 К. Значение $\operatorname{tg} \delta$ у полиэтилена при 4,2 К оказалось равным $2,5 \cdot 10^{-5}$. Значение диэлектрической проницаемости, измеренной на той же частоте, очень слабо зависит от температуры в интервале от 4,2 до 300 К, слегка уменьшаясь при повышении температуры (рис. 1 и 2). Было показано, что $\operatorname{tg} \delta$ полиэтилена в значительной степени зависит от температуры и частоты. Характерно, что ниже 90 К $\operatorname{tg} \delta$ полиэтилена не зависит от температуры, обнаруживая, тем не менее, слабую частотную зависимость. Так как значение $\operatorname{tg} \delta$ при этих температурах было очень мало ($\operatorname{tg} \delta = 2 \cdot 10^{-5}$), то не исключена возможность того, что наблюдаемая вблизи температуры жидкого гелия частотная зависимость $\operatorname{tg} \delta$ обусловлена частотной зависимостью измерительной схемы. Уменьшение диэлектрической проницаемости полиэтилена при повышении температуры, возможно, связано с тем, что для расчета ϵ во всем исследованном интервале температур использовалось значение толщины образца, измеренное при температуре 300 К, и не учитывалось ее изменение с температурой. Другой причиной, приводящей к зависимости ϵ от температуры, может явиться изменение плотности полиэтилена при изменении температуры от 300 до 4,2 К.

Политетрафторэтилен, как и полиэтилен, является неполярным полимером с низким значением $\operatorname{tg} \delta$. При измерении диэлектрических потерь в этом полимере вблизи температуры жидкого гелия было получено довольно низкое их значение

$\operatorname{tg} \delta = 2 \cdot 10^{-5}$ на частоте 1 кГц, в то время как при температуре 300 К $\operatorname{tg} \delta = 3 \cdot 10^{-4}$.

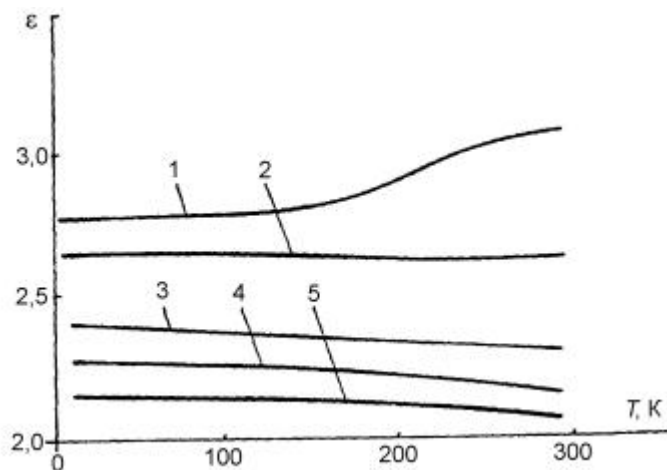


Рис. 1. Зависимость диэлектрической проницаемости ϵ от температуры T :
1 — полиэтилентерефталат; 2 — полистирол; 3 — полипропилен;
4 — полиэтилен; 5 — фторопласт

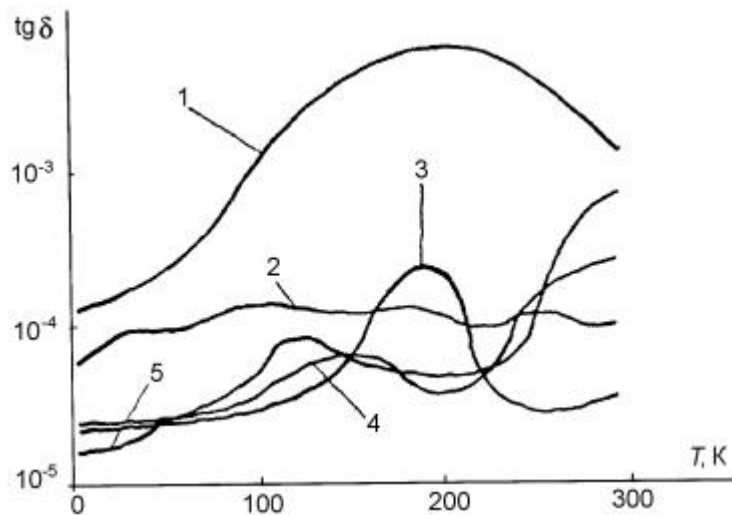


Рис. 2. Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta$ от температуры T :
1 — полиэтилентерефталат; 2 — полистирол; 3 — полипропилен;
4 — полиэтилен; 5 — фторопласт

Наиболее подробное исследование диэлектрических свойств политетрафторэтилена в интервале температур от 4,2 до 300 К было предпринято Chart M. J. (1967). Политетрафторэтилен является полимером с наиболее низкой диэлектрической проницаемостью ($\epsilon = 2,1$), которая незначительно (на 0,05) уменьшается при изменении температуры от 4,2 до 300 К. На графике

$\text{tg } \delta = f(T)$ у политетрафторэтилена наблюдается интенсивный максимум диэлектрических потерь при 178 К. Значение $\text{tg } \delta$ политетрафторэтилена при 4,2 К в диапазоне от 50 Гц до 10 кГц практически остается постоянным и составляет $1,2 \cdot 10^{-6}$. Эти значения в 10 раз меньше значений $\text{tg } \delta$, приведенных Allan R. N., Kuffel E. (1968). Такое различие может быть связано с тем, что разные авторы исследовали образцы политетрафторэтилена, имевшие различную предысторию, в том числе разные плотность и степень кристалличности. Ни в одной работе сведения об этих характеристиках политетрафторэтилена не приводятся.

Полипропилен, как и два рассмотренных выше полимера, является неполярным. Диэлектрическая проницаемость его несколько выше, чем у политетрафторэтилена и полиэтилена, но, так же как у этих полимеров, очень слабо зависит от температуры, почти не изменяясь в интервале температур от 4,2 до 300 К. При 116 К в полипропилене наблюдается заметный максимум диэлектрических потерь. Из экспериментальных данных Chart M. J. (1967) следует, что ниже этой температуры возможно существование еще одного максимума $\text{tg } \delta$, на который накладывается интенсивный и широкий пик, наблюдаемый при 116 К. При температуре жидкого гелия у полипропилена на частоте 75 Гц $\text{tg } \delta = 2 \cdot 10^{-5}$. Значение $\text{tg } \delta$ в полипропилене при 4,2 К в диапазоне от 50 Гц до 20 кГц практически не зависит от частоты и составляет $3,5 \cdot 10^{-6}$.

Диэлектрическая проницаемость слабополярного полимера полистирола в интервале температур 4,2–300 К составляет 2,52 и не зависит от температуры. От 70 до 300 К наблюдается небольшое снижение ϵ . В целом ϵ полистирола изменяется так же, как у неполярных полимеров (полиэтилен, политетрафторэтилен).

Полиэтилентерефталат относится к полярным полимерам. У полярных полимеров диэлектрическая проницаемость несколько выше, чем у неполярных. Однако теоретически ϵ полярных полимеров должно уменьшаться ниже некоторой критической температуры, а при более низких температурах материал должен вести себя как неполярный полимер. Как видно из рис. 1, значение диэлектрической проницаемости полиэтилентерефталата в интервале температур от 4,2 до 300 К снизилось приблизительно на 12–14 %, оставаясь, однако, выше, чем у неполярных диэлектриков. Значение тангенса угла диэлектрических потерь у полиэтилентерефталата выше, чем у неполярных диэлектриков. Диэлектрическая проницаемость неполярных диэлектриков, к которым относятся полиэтилен, полистирол, политетрафторэтилен, полипропилен, с понижением температуры увеличивается на 4–5 %, а у полярных, таких как полиэтилентерефталат, уменьшается на 12–15 %.

Все неполярные материалы имеют очень малое значение тангенса угла диэлектрических потерь, порядка $(5 \div 20) \cdot 10^{-5}$ при температуре 4,2 К, в характере их температурных зависимостей существует определенное сходство. У полярных материалов значение тангенса угла диэлектрических потерь больше, чем у неполярных, но для большинства исследованных материалов потери при 4,2 К значительно ниже, чем при 300 К. При изменении частоты в узком

диапазоне от 75 до 1000 Гц как у неполярных, так и у полярных материалов наблюдается некоторый рост

тангенса угла диэлектрических потерь (рис. 3).

Свойства диэлектриков в сильных полях характеризуются электрической прочностью $E_{пр}$. Электрическую прочность диэлектрика можно рассматривать

как важнейшую его характеристику, так как ее нарушение приводит к выходу из строя конструкции в целом.

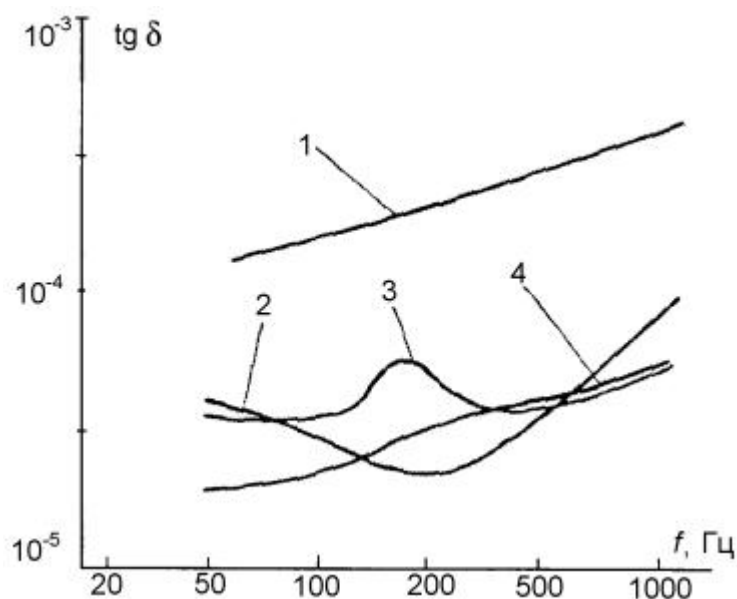


Рис. 3. Частотная зависимость тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta$ при температуре 4,2 К:
1 — полиэтилентерефталат; 2 — полипропилен;
3 — политетрафторэтилен; 4 — полиэтилен

Низкие температуры оказывают положительное влияние на электрическую прочность полимерных диэлектриков, так как при охлаждении уменьшается вероятность теплового пробоя и влияние примесей. Примеси не создают свободных электронов, уменьшается средняя длина пробега электронов. Преобладающее влияние на электрическую прочность оказывают характеристики среды и окружающий материал. Наибольшее ее увеличение наблюдается в жидком азоте. В жидком гелии, из-за диэлектрической проницаемости гелия, близкой к единице, малой электрической прочности, возникают сильные частичные разряды. Распространяясь на значительные расстояния от электродов и перенося все напряжение в какую-либо точку поверхности диэлектрика, они могут вызвать пробой в наиболее слабом месте образца. В особо тонких слоях (полимерные пленки менее 10 мкм) из-за неоднородности материала и местных дефектов его структуры электрическая прочность снижается. Например, по данным Н. Г. Анищенко и В. Ф. Минеина (1973), на 1 м² лавсановой пленки толщиной 10 мкм приходится до 250 точечных дефектов, снижающих напряжение пробоя $U_{пр}$ пленки более чем в 3 раза по сравнению с однородным материалом.

Электрическая прочность полимерных пленок, как правило, уменьшается с увеличением толщины образца (рис. 4). Поэтому использование тонкослойной

изоляции в несколько слоев предпочтительнее, чем толстослойной. Однако такое решение при создании электроизоляционных конструкций не является однозначным, так как в многослойной изоляции, пропитанной, например, жидким гелием, при напряженности 15–20 кВ/мм появляются частичные разряды, приводящие к электрическому старению твердой изоляции [3].

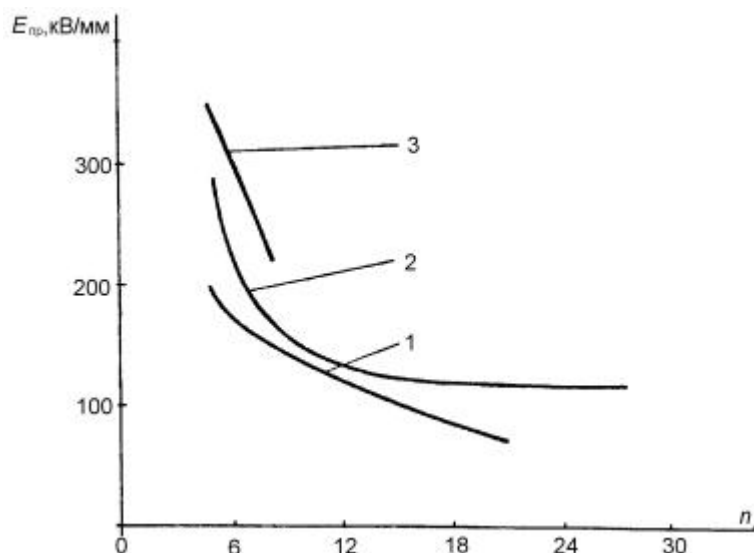


Рис. 4. Зависимость электрической прочности $E_{пр}$ пленки полиэтилентерефталата от числа слоев n (толщина пленки 10 мкм): 1 — на воздухе, 293 К; 2 — в жидком азоте, 77 К; 3 — в жидком гелии, 4,2 К

При выборе рабочей напряженности $E_{раб}$ электрического поля в электроизоляционных конструкциях необходимо исключать возможность появления частичных разрядов в объеме многослойной изоляции, пропитанной жидким криоагентом. В связи с этим $E_{раб}$ оказывается значительно меньшей, чем приведенные выше значения $E_{пр}$ для различных видов многослойной изоляции. Например, в многослойной электроизоляционной конструкции из полиэтилена в жидком гелии (5 К; 0,4 МПа) рекомендуемая $E_{раб}$ примерно 10 кВ/мм, в то время как $E_{пр}$ такой конструкции — 30 кВ/мм.

Рассмотрение механических свойств диэлектриков, способных работать в конструкциях криорезистивных индукторов, не менее важно, чем электрических, так как пробой изоляции во многих случаях может быть вызван и механическим разрушением.

Для полимерных материалов характерны большие значения коэффициента температурного расширения по сравнению с металлами (рис. 5). Поэтому в тех конструкциях, где комбинируется металл с полимерными материалами, большую опасность представляет возможность разрушения под влиянием термического напряжения, возникающего при охлаждении. Как видно из рис. 5, основная температурная деформация происходит при охлаждении до температур порядка 80 К. Если при этой температуре разрушения не произошло, то есть основания полагать, что оно не произойдет и при дальнейшем охлаждении, так как дальнейшее линейное сокращение незначительно. Температур порядка 80 К. Если при этой температуре разрушение не произошло, то есть основания полагать, что оно не произойдет и при дальнейшем охлаждении, так как дальнейшее линейное сокращение незначительно.

Для снижения коэффициента термического сжатия полимеров до значений, сопоставимых с таковыми для металлов, применяют наполнители, но и при этом нужно очень тщательно подходить к вопросам конструирования с целью максимального снижения остаточного сжатия, вызванного различием коэффициентов термического сжатия. Установлено, например, что волокнистые наполнители обычно увеличивают вязкость полимерных материалов, а нейлон, упроченный рубленым стеклянным волокном, может использоваться при необходимости получения прочности и вязкости.

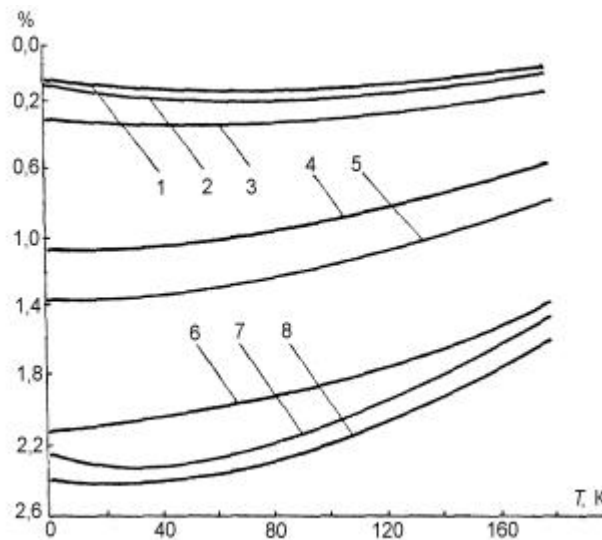


Рис. 5. Зависимость степени линейного теплового расширения пластмасс и металлов от температуры T :

1 — ниобий; 2 — сталь; 3 — медь; 4 — эпоксидная смола; 5 — нейлон;
6 — тефлон; 7 — КО-резина; 8 — полиэтилен

Как и для металлов, основным признаком прочности полимеров при работе в области низких температур являются пластичность и динамическая вязкость, которые уменьшаются с понижением температуры, в то же время увеличиваются прочность и твердость. Из известных полимеров наиболее благоприятными свойствами обладают фторполимеры — тетрафторэтилен (ТФЭ), фторэтиленпропилен (ФЭП), хлоротетрафторэтилен (ХТФЭ).

Предел прочности и предел пластичности растут с понижением температуры, а относительное удлинение при разрыве падает. При криогенных температурах происходит почти полное сближение пределов прочности и пластичности ТФЭ и ФЭП, но все же степень сближения у ТФЭ меньше, что свидетельствует о его большей пригодности для работы в криогенных конструкциях. ТФЭ, ФЭП и ХТФЭ сохраняют некоторую степень эластичности вплоть до температуры кипения жидкого водорода.

При температуре ~ 20 К происходит резкий излом кривых (температура стеклования). При дальнейшем понижении температуры изменение удлинения крайне незначительно.

При нормальной температуре ФЭП мягче ТФЭ, но при охлаждении, уже при $(230 \div 240)$ К, он становится жестче и прочнее ТФЭ. Подобное явление наблюдается и при растяжении этих материалов. ХТФЭ сохраняет большую степень жесткости и прочности во всем диапазоне температур.

В работе [4] рассматривается поведение ТФЭ, ХТФЭ и полиэтилена при криогенных температурах, вплоть до 4 К. Обнаружено, что ХТФЭ и полиэтилен разрушаются при 4 К под воздействием сжимающих нагрузок $303 \cdot 10^6$ и $107 \cdot 10^6$ Н/м² соответственно.

Увеличение кристалличности образцов повышает прочность на сжатие в противоположность тому, что наблюдалось при растяжении.

Низкие температуры оказывают на свойства при изгибе такое же действие, как и при сжатии.

Выводы:

1. Анализ рассмотренных электрических и механических свойств полимерных электроизоляционных материалов показывает возможность применения их в электротехнических конструкциях с криогенным охлаждением.

2. Использование неполярных диэлектрических материалов в индукторе с самокомпенсацией реактивной мощности характеризуется весьма низким значением потерь в диэлектрике конструкции. На азотном уровне ($T = 77$ К) охлаждения обмотки индуктора и при рабочей частоте источника питания 1000 Гц потери активной мощности $P_{уд}$ составляют около 5×10^2 Вт/м³, при естественном охлаждении ($T = 293$ К) и той же частоте $P_{уд}$ на порядок выше.

3. Необходимо учитывать, что рабочее напряжение $E_{раб}$ многослойной изоляции с толщиной слоя порядка 10 мкм в 3 раза меньше, чем ее электрическая прочность $E_{пр}$.

4. Одним из главных факторов выбора того или иного материала следует считать механические свойства, а не диэлектрические, которые в подавляющем большинстве случаев при криогенных температурах выше, чем при 293 К, а также совместимость электроизоляционных материалов с основными рабочими материалами по коэффициенту линейного расширения и изменению механических свойств в условиях криогенного охлаждения.

5. Несмотря на различие коэффициентов линейного теплового расширения металлов и диэлектрических материалов (например, медь и фторопласт — порядка 2 %), опасаться за целостность конструкции нет оснований, поскольку пленочные материалы достаточно гибки при низких температурах, так как при изгибе

тонких элементов не возникает больших напряжений.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Kuvaldin A. B., Andryushin N. F., Zakharov I. V.* Analysis of the electrical and energy parameters of a multilayer inductor with self-compensation of reactive power // *Electrical Technology, Great Britain.* 1995. № 3.
2. А. с. 1538287 СССР, МКИ Н 05 В 6/42. Устройство для индукционного нагрева // Соколов М. М., Кувалдин А. Б., Гусев Г. Г. и др. Оpubл. в БИ, 1990, № 3.
3. *Справочник по физико-техническим основам криогеники* // Малков М. П., Данилов И. Б., Зельдович А. Г. и др. М.: Энергоатомиздат, 1985.
4. *Swenson C. A.* Mechanical properties of Teflon at low temperatures // *Rev. Sei. Instr.* 1954. Vol. 25, № 8.

B. B. Utegulov, I. V. Zakharov, A. D. Izhikova

PPROSPECTS OF USING DIELECTRICS IN COMPENSATING INDUCTORS

The article considers electrophysical properties of dielectrics having good prospects to be used in compensating inductors. The authors show possibility to use the materials under low temperature cooling.