

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

к расчету маршрута калибров для эмалирования проволоки

В настоящее время при эмалировании проволоки диаметром 0,1 мм и более применяют калибровый способ нанесения лака, позволяющий регулировать толщину наносимого покрытия на каждом проходе и, соответственно, время испарения растворителя. В слоях лака одинаковой толщины условия полимеризации и поликонденсации смолы будут неизменными по всем проходам и, следовательно, многослойная изоляция эмалированного провода будет более однородной и стабильной по своим электрическим и физико-механическим свойствам. Но, как показывает практика, на отечественных заводах этому вопросу уделяется мало внимания. Единственная общепринятая методика расчета калибров, приведенная в работах И.Б. Пешкова [1, 2, 4], является достаточно трудоемкой и почти нигде не используется технологами. Подбор калибров производится практически интуитивно, исходя из опыта работы эмалировщиков с различными лаками и проводами различных диаметров, или используются рекомендации фирм-производителей эмалировочных агрегатов. Не касаясь вопросов выбора температурного и скоростного режимов эмалирования, можно считать, что процессы структурирования лаковой пленки, ее толщина и степень завершенности химической реакции по каждому слою лака никак не контролируются и не определяются. Поэтому говорить о способах повышения качества изоляции эмалированных проводов нет особого смысла, так как нет достаточно четких и определенных критериев условий формирования лаковой пленки, нет методов определения ее реальной толщины и, следовательно, возможности управлять ею в процессе производства эмалированных проводов.

Понятно, что наиболее высокие электроизоляционные свойства эмалированного провода могут быть реализованы только в том случае, если каждая ступень технологического процесса будет максимально приближена к оптимальной. В том числе и выбор маршрута калибров лакононосящего устройства.

В основу предлагаемого метода расчета калибров положены физико-химические процессы, происходящие в наносимом слое лака, начиная с момента его формирования в калибре и до выхода из эмальпечи.

Расчет диаметра калибров

При расчете маршрута калибров были приняты следующие обозначения: d_0 – диаметр проволоки, d_1, d_2, d_n – диаметры калибров по соответствующим проходам, n – количество проходов, δ_T – диаметральный слой твердой эмали, наносимой за один проход, δ_0 – диаметральный зазор между проволокой и калибром, $\delta_{жс}$ – диаметральный слой жидкого лака, наносимого за один проход, $\Delta_{жс}$ – суммарная диаметральный слой жидкого лака, Δ_T – диаметральный слой изоляции эмалированного провода.

В настоящее время на эмалировочных агрегатах используют оптимальную форму конических калибров с цилиндрической формирующей вставкой на выходе из калибра, что обуславливает ламинарное течение лака в зазоре с постоянной величиной градиента скорости. В таком зазоре среднее значение скорости течения жидкости будет в два раза меньше скорости движения провода. Следовательно, радиальная толщина наносимой за один проход жидкой эмали будет равна половине радиального зазора формирующей части калибра. В работе [4] аналогичный результат приведен как частный (граничный) случай для конического калибра, когда его входной и выходной радиусы одинаковы. С учетом сказанного для оптимальных калибров можно записать $\delta_0 = 2 \cdot \delta_{жс}$.

Исходя из общих требований к выбору маршрута эмалирования для проводов, которые изготавливаются с применением оптимальных калибров, диаметр первого калибра $d_{1к}$ должен быть больше диаметра провода на величину δ_0 – диаметрального зазора между проволокой и калибром

$$d_{1к} = d_0 + \delta_0 \quad (1)$$

Толщина слоя лака, наносимого за один проход, определяется числом проходов проволоки через ванну с лаком, величиной сухого остатка, скоростью эмалирования, вязкостью лака [2, 3]. Диаметр следующего калибра $d_{2к}$ определяется величиной сухого остатка лака и может быть рассчитан как

$$d_{2к} = d_0 + \delta_T + \delta_0$$

При числе проходов эмалирования n диаметр промежуточного i -го калибра равен

$$d_{ik} = d_0 + \delta_0 + \delta_0 + (i - 1) \cdot \delta_T \quad (2)$$

Если маршрут калибров подбирается таким образом, чтобы $\delta_0 = const$ по всем проходам, тогда постоянной будет и толщина слоя эмали $\delta_T = const$, наносимая на каждом проходе. В этом случае последнее уравнение принимает вид

$$d_{ik} = d_0 + \delta_0 + (i - 1) \cdot \delta_0 \cdot P_{об} = d_0 + \frac{\delta_T}{P_{об}} + (i - 1) \cdot \delta_T \quad (3)$$

Для последнего прохода, когда $i = n$

$$d_{nk} = d_0 + \delta_0 + (n - 1) \cdot \delta_0 \cdot P_{об} = d_0 + 2 \cdot \delta_{жс} + (n - 1) \cdot 2 \cdot \delta_{жс} \cdot P_{об} = d_0 + \frac{\delta_T}{P_{об}} + (n - 1) \cdot \delta_T \quad (4)$$

где $\delta_{жс}$ – диаметральный слой лака, наносимая за один проход.

Как следует из последних уравнений, для расчета диаметров калибров необходимо знать величину сухого остатка P .

При переходе лака из жидкого состояния в твердое существенно уменьшается его объем. Величину сухого остатка P

определяют по ТУ 16.К71-074–90 и она приводится в технической документации на каждый лак. Значение P берется в относительных единицах и принято считать, что оно численно равно отношению толщины твердой эмалевой пленки провода к толщине нанесенного слоя лака $P = \frac{\delta_T}{P_{\text{ж}}}$.

Однако абсолютное значение сухого остатка, приводимое в технической документации, является завышенным, так как оно определяется путем запечки лака при $T = 200 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 45 мин. При этих условиях реакция поликонденсации не успевает пройти до конца и степень завершенности химической реакции будет незначительна, существенно ниже, чем в реальном технологическом процессе. Для большинства лаков величина сухого остатка P , согласно технической документации, составляет приблизительно 10–35 %.

Кроме того, в процессе нанесения лака и его запечки действует ряд факторов, приводящих к уменьшению толщины эмалевого покрытия. К их числу относятся:

- p_1 – вытяжка лаковой пленки на выходе из калибра ($p_1 = 50 \%$);
- p_2 – вытяжка провода в процессе эмалирования ($p_2 \approx 1\text{--}3 \%$);
- p_3 – унос низкомолекулярных фракций лака в процессе его запечки в эмальпечи ($p_3 \approx 5\text{--}10 \%$).

Поскольку экспериментальное определение каждого из этих параметров представляет определенные трудности и связано с отработкой методики эксперимента, приближенное значение обобщенного параметра $P_{\text{об}}$ можно рассчитать для каждого лака, исходя из практического опыта эмалирования и установленных на данном эмальагрегате размерах калибров.

Расчет обобщенного параметра $P_{\text{об}}$

В зависимости от числа проходов суммарная диаметрально-толщина наносимого слоя жидкого лака $\Delta_{\text{ж}}$ может быть рассчитана по уравнению

$$2\Delta_{\text{ж}} = (d_1 - d_0) + (d_2 - d_0 - \delta_T) + (d_3 - d_0 - 2\delta_T) + \dots + [d_n - d_0 - (n-1) \cdot \delta_T] = \sum (d_i - d_0) - \frac{n \cdot (n-1) \cdot \delta_T}{2} \quad (5)$$

Из этого уравнения следует, что на последнем проходе наносится слой жидкого лака, толщину которого можно определить по уравнению

$$2 \cdot \delta_{\text{ж}} = \delta_0 = d_n - d_0 - (n-1) \cdot \delta_T \quad (6)$$

Такой же будет эта величина и на любом другом проходе, если диаметры калибров рассчитаны согласно уравнениям (2, 4).

Если калибры подобраны экспериментальным путем, исходя из предыдущего опыта работы, тогда обобщенную величину сухого остатка $P_{\text{об}}$ можно рассчитать по сумме всех проходов, используя уравнение (7)

$$P_{\text{об}} = \frac{\Delta_T}{2 \cdot \Delta_{\text{ж}}} = \frac{\Delta_T}{\sum (d_i - d_0) - \frac{(n-1) \cdot \Delta_T}{2}} \quad (7)$$

Если маршрут калибров был ранее рассчитан по данной методике, тогда обобщенное значение сухого остатка можно рассчитать по любому проходу, в том числе и по последнему, с помощью уравнения (8)

$$P_{\text{об}} = \frac{\delta_T}{2 \cdot \delta_{\text{ж}}} = \frac{\delta_T}{d_n - d_0 - (n-1) \cdot \delta_T} = \frac{\Delta_T}{n \cdot (d_n - d_0) - \Delta_T \cdot (n-1)} \quad (8)$$

Расчет величины $P_{\text{об}}$ по уравнению (8) менее трудоемок, так как слои нанесенного лака по каждому проходу одинаковы и знак суммы можно заменить произведением $n \cdot (d_n - d_0)$.

Приближенное значение обобщенного параметра $P_{\text{об}}$ численно равно величине сухого остатка лака, находящегося в слое $\delta_{\text{ж}}$ и распределенного в объеме вдвое больше, обусловленным зазором d_0 . Его величина может быть найдена также через фактическое значение сухого остатка (если оно известно достаточно точно) для каждого лака как $P_{\text{об}} = p_1 \cdot p - p_2 - p_3$.

В работе [5] для лака ПЭ-943 рассчитанное значение $P_{\text{об}} = 0,106$. Если задать значения параметров $p_2 = 0,01$, а $p_3 = 0,06$, тогда найденное фактическое значение величины сухого остатка для этого лака составит

$$p = \frac{P_{\text{об}} + p_2 + p_3}{0,5} = \frac{0,106 + 0,01 + 0,06}{0,5} = 0,35$$

что хорошо согласуется с величиной сухого остатка этого лака $P = 0,32\text{--}0,36$

На рисунке приведена модель-гистограмма прохождения провода диаметром 0,56 мм через систему калибров (10 проходов) для наложения изоляционного слоя толщиной 40 мкм. Для наглядности рисунка и сохранения масштаба по оси ординат величина сухого остатка принята равной 0,5. Расчетные значения $\delta_T = 4 \text{ мкм}$, $\delta_{\text{ж}} = 8 \text{ мкм}$. Расчет диаметра калибров производился по уравнению (3) из которого следует, что наносимые толщины слоев лака одинаковы по всем проходам, что обеспечивает одинаковую степень структурирования полимерного покрытия.

Уравнение (4) позволяет также по установленному на эмальагрегате маршруту калибров рассчитать $\delta_{\text{ж}}$ и δ_T для каждого из проходов по известному сухому остатку. Такой расчет показывает, что при существующей на заводах практике подбора калибров толщина наносимого слоя лака постоянно увеличивается от первого прохода к последнему от 1,5 до 3 раз. Это означает, что внешние слои лака только по этой причине имеют меньшую степень запечки. А если учитывать то, что они еще и меньшее число раз проходят через печь, можно сделать вывод – толщины нанесенных на провод слоев лака далеки от оптимальных.

Поскольку величина сухого остатка лака $P_{\text{об}} = const$, используя уравнение (8) можно установить связь между числом проходов n и толщиной твердой эмали, наносимой за один проход.

Предположим, что число проходов увеличили от n_1 до n_2 при неизменной толщине эмали Δ_T , тогда можно записать, что

$$P_{\text{об}} = \frac{\Delta_T}{2 \cdot \Delta_{\text{ж}}} = \frac{\Delta_T}{\sum (d_i - d_0) - \frac{(n_1-1) \cdot \Delta_T}{2}} = \frac{\Delta_T}{\sum (d_i - d_0) - \frac{(n_2-1) \cdot \Delta_T}{2}} = \frac{\Delta_T}{\sum (d_i - d_0) - \frac{(n_1-1) \cdot \Delta_T}{2}} = \frac{\Delta_T}{\sum (d_i - d_0) - \frac{(n_2-1) \cdot \Delta_T}{2}} \quad (9)$$

Принимая во внимание, что Δ_T и $\delta_{\text{ж}}$ изменяются обратно пропорционально числу проходов, можно записать, что $n_1 \cdot \delta_{1\text{ж}} = n_2 \cdot \delta_{2\text{ж}} = \Delta_{\text{ж}} = const$.

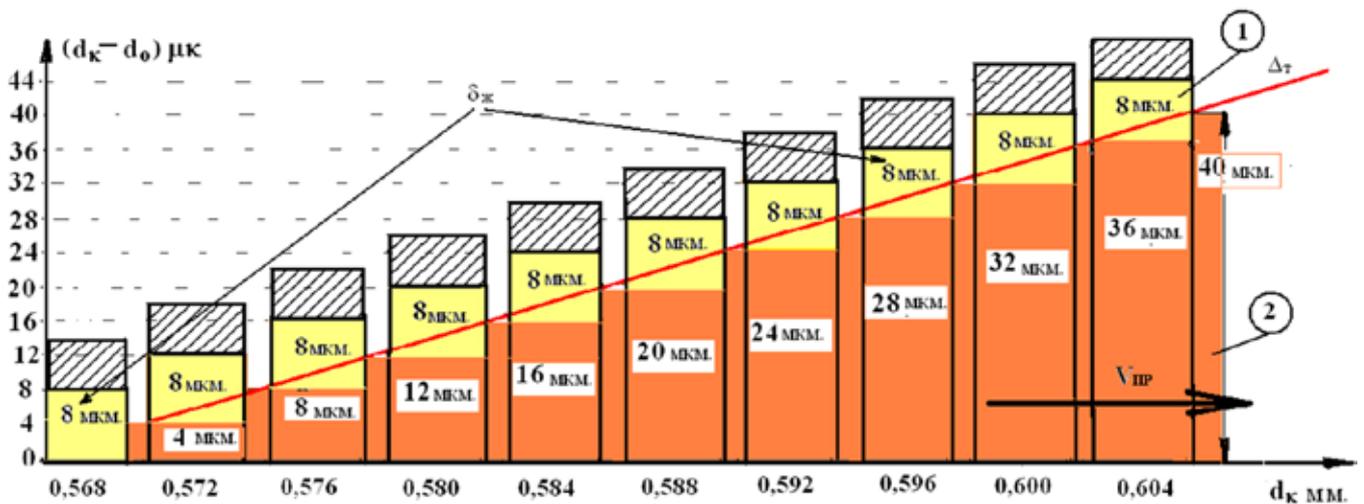


Рис. Зависимость толщины эмалевого покрытия $\delta_{э}$ и слоя наносимого лака $\delta_{л}$ по проходам от диаметра калибра при $d_0 = 0,56$ мм, $P_{=0,5}$, $\Delta_T = 40$ мкм, $\delta_T = 4$ мкм, $\delta_{л} = 8$ мкм: 1 – слой лака, 2 – слой эмали

При постоянном шаге калибров $h = d_{i+1} - d_i = const$ решением уравнения (9) является равенство

$$n \cdot h = \Delta_T \text{ или } h = \delta_T. \quad (10)$$

Таким образом, толщина эмалевой пленки, наносимой за один проход, равна шагу калибров.

Как следует из рисунка, это условие выполняется на всех проходах, следовательно, процесс структурирования полимерного покрытия будет ближе к оптимальному, чем при использовании маршрута калибров, установленного практическим путем.

Предлагаемая методика расчета калибров была использована на ЗАО «Сибкабель» при эмалировании лаком ПЭ-943 провода ПЭТВ-2 диаметрами 0,335, 0,80, и 1,0 мм и показала положительные результаты. Рассчитанные маршруты калибров обеспечили более равномерную толщину элемен-

тарных слоев лака, наносимых за каждый проход, увеличение минимальных значений пробивного напряжения и механической прочности изоляции и как следствие – увеличение скорости эмалирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Леонов В.М., Пешков И.Б., Рязанов И.Б., Холодный С.Д. Основы кабельной техники: учеб для вузов / Под ред. И.Б. Пешкова. – М.: Изд. центр «Академия», 2006. – 432 с.
2. Пешков И.Б. Обмоточные провода. – М.: Энергия, 1995. – 416 с.
3. Холодный С.Д. Технология термообработки изоляции кабелей и проводов. – М.: МЭИ, 1994. – 160 с.
4. Шварцбург Е.Я. Определение толщины жидкой пленки при эмалировании круглой проволоки с помощью калибров // Кабельная техника. – 1963. – вып. 6. – С. 9–11.
5. Петров А.В., Дзюбань Г.Н., Елисеева О.Н. Расчет диаметра калибров для эмалирования проволоки // Кабель-news. – 2009. – № 8. – С. 57–60.

PS. Выражаю свою глубокую благодарность руководителю отдела обмоточных проводов ЗАО «Сибкабель» Дзюбаню Г.Н. и старшему технологу Елисеевой О.Н. за оказанное содействие и помощь в проведении экспериментальной части работы.

ТОЧКА ЗРЕНИЯ СПЕЦИАЛИСТА-ПРАКТИКА

Ю.А. Зеленецкий, технический директор – первый заместитель генерального директора ОАО «Завод Микропровод»

Вызывает сомнение принятый в статье А.В. Петрова «Основные положения к расчету маршрута калибров для эмалирования проволоки» принцип нанесения равного количества лака на каждом проходе как фактор, обеспечивающий оптимальные условия формирования каждого слоя лаковой пленки.

Автором не учтен ряд факторов, в частности:

- формирование лаковой пленки на медной жиле – это динамический процесс, в котором тепловая энергия циклически, на каждом проходе, расходуется не только на формирование лаковой пленки, но и на нагрев медной жилы. Нагретый эмалированный провод при обратном движении охлаждается. В данной статье не учитывается расход тепловой энергии на нагрев медной жилы, который, учитывая увеличивающееся по мере нарастания толщины тепловое сопротив-

ление лаковой пленки, не является одинаковым на первом и последнем проходах;

- в процессе набора необходимой толщины первый лаковый слой проходит до 15 раз через зону нагрева, последний лаковый слой проходит один раз. Следовательно, предлагаемое автором нанесение одинаковой толщины эмальлака на каждом проходе не является достаточным для обеспечения равных условий испарения растворителя и полимеризации в каждом слое эмальпленки.

Несмотря на спорность постулата о том, что равномерность нанесения слоев электроизоляционного лака является фактором, обеспечивающим равнозначность условий формирования каждого слоя лака, заслуживает внимание попытка автора упростить расчет, уйти от эмпирического подхода при подборе маршрута калибров.

ОТВЕТ А.В. ПЕТРОВА

Считаю достаточно обоснованным замечание Ю.А. Зеленецкого о том, что «предлагаемое автором нанесение одинаковой толщины эмалевого покрытия на каждом проходе не является достаточным для обеспечения равных условий испарения растворителя и полимеризации в каждом слое эмальпленки». Действительно, для такого заключения необходимо знать распределение температуры лаковой пленки по длине печи. В данной статье такой расчет был сделан только для первого прохода, где температура эмалевого покрытия была принята равной температуре провода. Для последующих слоев лака тепловое сопротивление внутренних слоев не учитывалось, так как тепловой поток направлен от поверхности провода внутрь и количество тепла, приходящееся на наружный слой лака постоянный по всем проходам. По мере увеличения числа проходов тепловое сопротивление покрытия будет увеличиваться, а температура провода на выходе из печи понижаться. Таким образом, на последнем проходе температура лаковой пленки должна быть несколько выше, чем на первом. Однако чтобы показать насколько значимо это повышение температуры, необходимо провести тепловой расчет процесса эмалирования проволоки. В настоящее время нет достаточно точной инженерной методики этого расчета по ряду причин. В том числе и из-за отсутствия данных по распределению температуры воздуха по длине печи.

Если исходить из максимальной скорости нагревания (u) в зоне пленкообразования $u = \epsilon_3 \cdot \Delta^{-\epsilon_4}$, то из нее следует, что для полиэфирного лака ($\epsilon_4 = 4,05$), например, при увеличении толщины эмалевого слоя за один

проход в два раза, скорость нагревания необходимо уменьшить в 16 раз для сохранения равных условий структурирования (*Основы кабельной техники / Под ред. И.Б. Пешкова. – М. 2006*). С другой стороны, время, необходимое для пленкообразования, при увеличении ее толщины в два раза увеличивается более чем в четыре раза (*Пешков И.Б. Обмоточные провода. – М.: Энергия, 1983. С. 125*).

В моей статье, вышедшей в журнале «Кабель-News», показано, что применяемые на практике маршруты калибров подбраны таким образом, при котором толщина наносимой за один проход эмали увеличивается от первого прохода к последнему в 3–4 раза (от 3 до 11 мкм.). Если принимать в расчет только время пленкообразования, то получается, что наружные слои будут недосушенными. Время их пребывания в зоне пленкообразования должно быть значительно больше. Для более точного расчета маршрута калибров необходима методика расчета степени завершенности химической реакции процесса структурирования лака, которая учитывала бы нелинейную зависимость распределения температуры лака по длине печи и толщине покрытия.

На внутренних слоях степень запечки существенно повышается за счет их многократного прохода через печь, а наружный слой будет всегда недосушенным, чему способствует еще и его большая толщина.

Исходя из изложенного, я предлагаю, как один из возможных вариантов – сделать наносимые слои эмали одинаковыми по толщине на всех проходах.

Выражаю глубокую благодарность Ю.А. Зеленецкому за отмеченные в статье недостатки.

ПОДПИСКА НА II ПОЛУГОДИЕ 2010 года В ЛЮБОМ ОТДЕЛЕНИИ СВЯЗИ!

Уважаемые читатели!
Оформить подписку на журнал «Кабели и провода» очень просто. В любом отделении связи на территории России принимается подписка по каталогу агентства «Роспечать». Вам необходимо только вписать Ваши имя, фамилию и адрес доставки в купон, вырезать его и оплатить подписку по цене, указанной в этом каталоге.

Министерство связи РФ		АБОНЕМЕНТ на <u>газету</u> <input type="checkbox"/> <u>журнал</u> <input checked="" type="checkbox"/>		7 9 9 4 3	
Кабели и провода				(индекс издания)	
(наименование издания)		Количество комплектов:			
на 2010 _____ год по месяцам					
1	2	3	4	5	6
7	8	9	10	11	12
Куда _____		(почтовый индекс) _____ (адрес) _____			
Кому _____		(фамилия, инициалы)			

ДОСТАВОЧНАЯ КАРТОЧКА		на <u>газету</u> <input type="checkbox"/> <u>журнал</u> <input checked="" type="checkbox"/>		7 9 9 4 3	
Кабели и провода				(индекс издания)	
(наименование издания)					
Стоимость	подписки _____ руб.	Количество комплектов:			
	переадресовки _____ руб.				
на 2010 _____ год по месяцам					
1	2	3	4	5	6
7	8	9	10	11	12
Куда _____		(почтовый индекс) _____ (адрес) _____			
Кому _____		(фамилия, инициалы)			

ПОДПИСКА ПО КАТАЛОГУ «РОСПЕЧАТЬ»