

Расчет диаметра калибров для эмалирования проволоки

Главным достоинством нанесения лака на провод с помощью калибров является возможность регулирования толщины наносимого слоя, что позволяет оптимизировать время испарения Растворителя и время структурирования. В слоях одинаковой толщины степень завершенности химической реакции будет постоянной. Следовательно, многослойная изоляция эмалированного провода будет более однородной по своим свойствам.

В настоящее время нет достаточно приемлемой для инженерного расчета методики подбора маршрута калибров, температурного и скоростного режима эмалирования. В большинстве случаев решение этих проблем при изготовлении эмалированных проводов производится опытным путем, исходя из многолетней практики обслуживания эмальагрегатов. И как показывает практика, подбор маршрутов калибров для эмалирования опытным путем не всегда дает оптимальный результат. В связи с указанным, на разных заводах, при изготовлении одного и того же типоразмера провода, применяемые маршруты калибров не совпадают при одинаковом числе проходов. Провода получаются разного качества и с различной по цвету эмалевой пленкой.

Методика расчета маршрута калибров, приведенная в работе [1], требует нахождения большого количества вспомогательных величин, что значительно усложняет расчет, особенно для современных высокоскоростных эмальагрегатов с большим числом проходов.

На кафедре электроизоляционной и кабельной техники Томского политехнического института была разработана и на ЗАО «Сибкабель» апробирована инженерная методика расчета размеров калибров для производства эмалированных проводов промышленного применения.

Расчет диаметра калибров

Для проводов диаметром d_0 выше 0,1 мм, которые изготавливаются с применением неразъемных калибров, диаметр первого калибра $d_{1к}$ должен быть больше диаметра провода на величину диаметральной толщины наносимого слоя лака

$$d_{1к} = d_0 + \delta_{ж} . \quad (1)$$

Толщина слоя лака, наносимого за один проход, определяется числом проходов проволоки через ванну с лаком, скоростью эмалирования, вязкостью [1,2]. Стабильность толщины наносимого слоя лака ($\delta_{ж} = const$) является одним из основных условий, определяющих однородность физико-механических и электрических свойств изоляции эмалированного провода.

Диаметр следующего калибра $d_{2к}$ определяется величиной сухого остатка лака $P = \delta_T / \delta_{ж}$ и толщиной слоя эмали. Если маршрут калибров подобран таким образом, что $\delta_{ж} = const$ по всем проходам, тогда постоянной будет и толщина слоя эмали $\delta_T = const$, наносимая на каждом проходе. В этом случае диаметр калибра d_{kn} для любого номера прохода n будет равен

$$d_{kn} = d_0 + \delta_{ж} + (n-1) \cdot \delta_{ж} \cdot P . \quad (2)$$

Была проведена сравнительная оценка результатов расчета маршрута калибров по методике, изложенной в работе Пешкова И.Б и по предлагаемой методике. В качестве сравнения был взят пример расчета калибров при эмалировании лаком ВЛ-931 (винифлекс) медной проволоки диаметром $d_0 = 0,67$ мм для обеспечения наложения изоляции диаметральной толщиной $\delta = 0,04$ мм при количестве проходов $n = 6$, $P = 10$ [1]. Величина сухого остатка (P) приводится в технической документации этого лака.

Результаты расчетов приведены в таблице 1, из которых следует, что рассчитанные по предлагаемой методике размеры калибров находятся в хорошем соответствии с данными работы [1], и толщина лака, наносимая за каждый проход, лежит в пределах 68–71 мкм при расчетной величине $\delta_{ж} = 67$ мкм.

Таблица 1. Расчетные диаметры калибров мкм

№ калибра	1	2	3	4	5	6
По Пешкову	0,740	0,744	0,752	0,758	0,766	0,776
Автор	0,737	0,744	0,750	0,757	0,764	0,771
$\delta_{ж}$, мкм	70	67	68	67	69	71

Табл.2. Размеры калибров по данным ЗАО «Сибкабель»
Провод ПЭТВ-2, лак ПЭ-943, $d_0 = 0,80$ мм,
 $\Delta = 0,065$ мм, $n = 12$, $p = 0,106$

№ прохода	$D_{кр}$ мм	$\delta_{ж}$ мкм	$\Delta_{эм}$ мкм	$D_{эм}$ мм
1	0,83	30	3,2	0,803
2	0,84	36,8	7,1	0,807
3	0,85	42,9	11,6	0,812
4	0,86	48,4	16,7	0,817
5	0,87	53,3	22,4	0,822
6	0,88	57,6	28,5	0,829
7	0,89	61,5	35,0	0,835
8	0,90	65,0	41,9	0,842
9	0,91	68,1	49,1	0,850
10	0,92	70,9	56,6	0,857
11	0,93	73,4	64,4	0,864
12	0,94	75,6	72,5	0,873

Апробация результатов работы

Предлагаемая методика расчета калибров была апробирована на эмальобмоточном производстве ЗАО «Сибкабель». Целью этой работы являлась оценка качества технологических параметров эмалирования и их оптимизация. В табл.2 приведен пример одного из маршрутов калибров, применявшемся ранее на эмальагрегате VS-900 при эмалировании провода ПЭТВ-2 лаком ПЭ-943.

Исходя из применяемых на производстве маршрутов калибров при эмалировании провода ПЭТВ-2 лаком ПЭ-943 диаметром от 0,8 до 2,5 мм путем статистической обработки результатов было рассчитано усредненное значение величины P , которое составило для лака ПЭ-943 $P = 0,106$.

Затем по уравнению (2) рассчитали диаметр калибров по всем проходам, исходя из диаметральной толщины лака, наносимого на каждом проходе $\delta_{ж}$. Суммарная толщина эмали, после n -го прохода определялась как $\Delta_{нт} = \sum \delta_{нт}$.

В табл. 2 приведены размеры калибров, применявшиеся ранее на эмальагрегате, а в табл. 3 даны размеры калибров для этого же провода, рассчитанные по предлагаемой методике. Как следует из табл. 3 и рис. 1 шаг маршрута калибров уменьшился почти в два раза с 10 до 5,4 мкм, а толщина эмали, нанесенная на первом проходе возросла от $\delta = 30$ мкм до $\delta = 51$ мкм и остается постоянной на всем маршруте калибров (сплошные линии рис. 1). Толщина эмали, наносимая на каждом проходе, составляет $\Delta = 5,4$ мкм.

Табл.3. Расчетные размеры калибров ЗАО «Сибкабель»
Провод ПЭТВ-2, лак ПЭ-943, $d_0 = 0,80$ мм,
 $\Delta = 0,065$ мм, $n = 12$, $p = 0,106$

№ прохода	$D_{кр}$ мм	$\delta_{ж}$ мкм	$\Delta_{эм}$ мкм	$D_{эм}$ мм
1	0,851	51	5,4	0,805
2	0,856	51	10,8	0,811
3	0,862	51	16,2	0,816
4	0,867	51	21,6	0,822
5	0,873	51	27,0	0,827
6	0,878	51	32,4	0,832
7	0,883	51	37,8	0,838
8	0,889	51	42,3	0,842
9	0,894	51	48,6	0,848
10	0,999	51	54,1	0,852
11	0,905	51	59,5	0,859
12	0,910	51	64,9	0,865

Таким образом, рассчитанные по предлагаемому методу калибры для эмалирования проволоки позволяют максимально оптимизировать технологический режим эмалирования без больших и сложных для обслуживающего персонала расчетов.

Исходя из изложенного, можно сформулировать правило проверки маршрута калибров: *произведение шага калибров на число проходов должно быть равно толщине наносимой на провод твердой эмали.*

В качестве примера рассмотрим табл. 2 и табл. 3. Согласно табл. 2 при числе проходов $n = 12$ и шаге калибров $h = 10$ мкм толщина нанесенной на провод эмали должна быть $\Delta_T = 120$ мкм. Реальная толщина изоляционного покрытия составляет $\Delta_T = 65$ мкм. Следовательно приведенный в табл. 2 маршрут калибров далек от оптимального.

По данным приведенным в табл. 3 при том же числе проходов среднее значение шага калибров составляет $h = 5,4$ мкм расчетное значение $\Delta_T = 65$ мкм, что соответствует реальной толщине покрытия провода.

На рис. 1 представлены эти зависимости от числа проходов n (пунктирные кривые). Из приведенных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Диаметр первого калибра слишком занижен и при шаге калибров $h = 10$ мкм толщина пленки лака $\delta_{ж}$ постепенно увеличивается от 30 мкм на первом калибре до 75,6 мкм на двенадцатом.

2. В самых неблагоприятных условиях формирования твердого покрытия находятся внешние слои

Табл.4. Усредненные значения маршрута калибров и толщины изоляции

№ прохода	d_k мм среднее	$\delta_{ж}$ мм	Δ_T мм
1	0,85	0,05	0,0053
2	0,86	0,055	0,011
3	0,86	0,049	0,016
4	0,87	0,054	0,022
5	0,87	0,048	0,027
6	0,88	0,053	0,033
7	0,88	0,048	0,038
8	0,89	0,052	0,043
9	0,89	0,047	0,048
10	0,90	0,051	0,054
11	0,91	0,056	0,06
12	0,91	0,051	0,065

лака, что может привести их к вскипанию и (или) недостаточной степени структурирования.

3. Нелинейный рост $\Delta 1$ от числа проходов так же свидетельствует о возрастании толщины слоя эмали, наносимой на каждом проходе от $\Delta 1 = 3,2$ мкм после первого прохода до $\Delta 1 = 8,1$ мкм на последнем.

В заводской практике не всегда удается подобрать размеры калибров в строгом соответствии с расчетом. В таком случае приходится ставить калибр ближайшего размера с тем, чтобы отклонение его диаметра от расчетного были минимальны. Такая корректировка маршрута калибров приводит к увеличению отклонения толщины покрытия за один проход от его расчетного значения. При установленном по усредненным данным маршруте калибров уравнение (2) позволяет рассчитать реальную толщину лака, наносимого по каждому проходу и толщину эмали табл. 2.

При эмалировании провода диаметром 0,8 мм, при расчетном шаге калибров $h = 0,5$ мм, были установлены калибры диаметром кратным 0,010 мм. Для получения заданной толщины слоя лака, наносимого на каждом проходе, диаметр калибров увеличивался на 0,01 мм через каждые два прохода. Разброс толщин слоев лака от прохода к проходу составлял от 0,048 до 0,056 мм, т. е. не более 15%.

Как следует из рис. 2, прирост толщины твердого покрытия на каждом проходе различный. Однако это различие незначительно и условия структу-

Рис. 1. Зависимость толщины слоя лака δ и $\delta 1$, наносимого на каждом проходе и толщины эмали Δ и $\Delta 1$ от номера калибра. δ и Δ — рассчитанный маршрут калибров $\delta 1$ и $\Delta 1$ — маршрут калибров, установленный ранее на эмалиагрегате

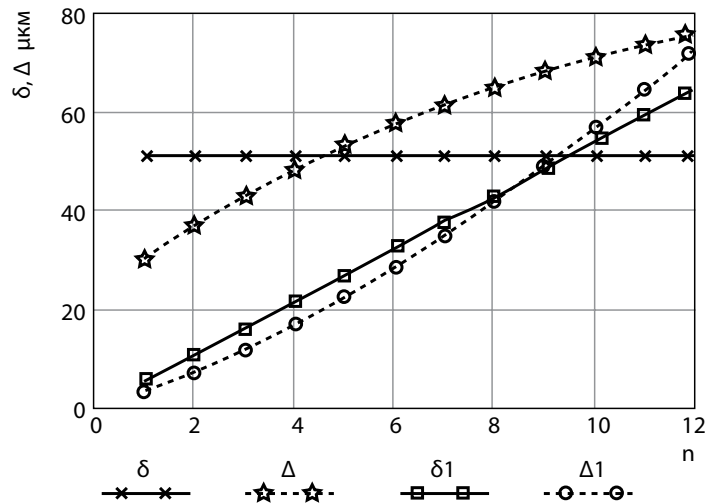
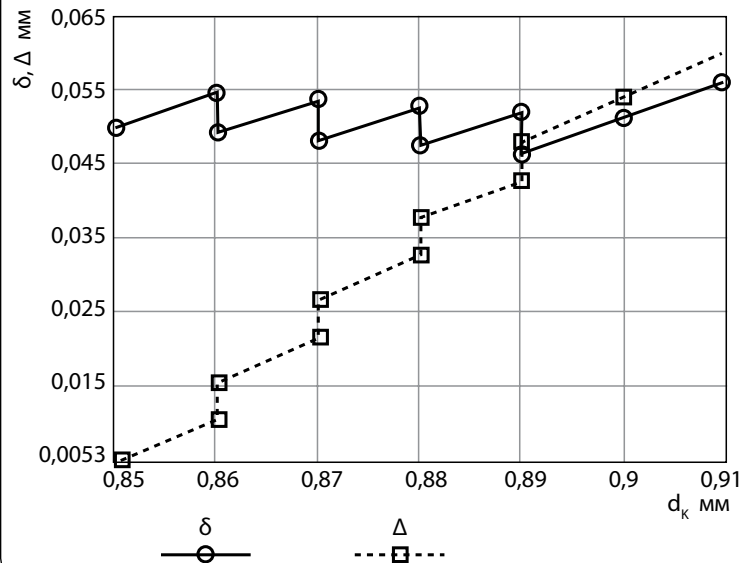


Рис. 2. Влияние усреднения расчетных диаметров калибров на толщину лака наносимого на каждом проходе (—) и толщину изоляции провода по проходам (- - -). $d_0 = 0,8$ мм

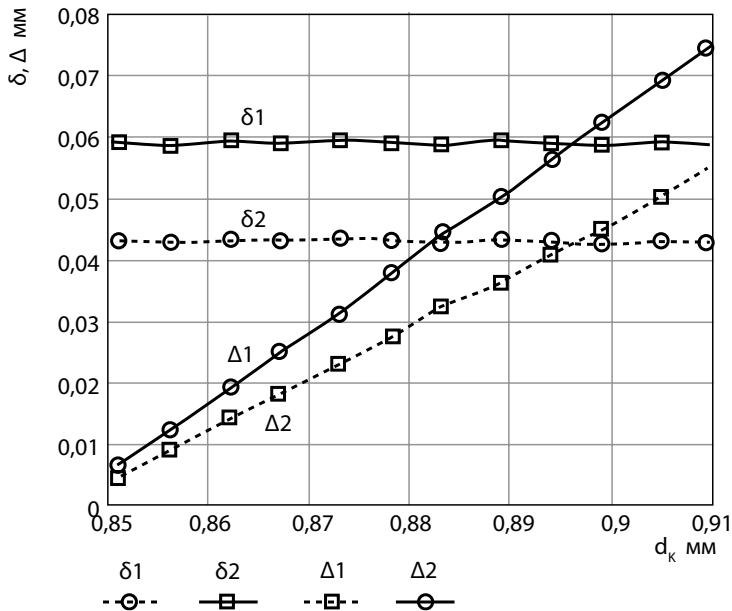


рирования лака по проходам существенно не изменяются. Примененный маршрут калибров (табл. 4, рис. 2) близок к оптимальному и существенно отличается от данных, приведенных в табл. 1 и на рис. 1.

Рис. 3. Расчетные зависимости диаметральной толщины лака наносимого на каждом проходе (δ_1 , δ_2) и толщины изоляции провода (Δ_1 , Δ_2) по каждому проходу.

d_k — диаметры калибров маршрута эмалирования.

Диаметр провода $d_0 = 0,8$ мм



В заводской практике при расчете маршрута калибров стараются учесть все возможные факторы, приводящие к уменьшению толщины слоя нанесенной эмали, например, вытяжку провода, допуск на диаметр провода и т.д.

По приведенному уравнению (2) были рассчитаны: маршрут калибров для номинального диаметра провода $d_0 = 0,8$ мм при средней толщине изоляции $\Delta_r = 0,56$ мм, толщина слоя лака, наносимого за один проход и толщина эмали (рис. 3). Как следует из этого рисунка, если эмалируется провод с максимальным положительным допуском $d_0 = 0,8 + 0,008$ мм, толщина лака, наносимого за один проход, составляет 0,042 мм, а полная толщина изоляции $\Delta_r = 0,055$ мм. При эмалировании на этом же маршруте калибров провода с отрицательным допуском $d_0 = 0,8 - 0,008$ мм толщина наносимого за один проход лака увеличивается до 0,059 мм, а полная толщина эмали до $\Delta_r = 0,075$ мм.

Таким образом, если даже не учитывать допуск на диаметр провода, то при правильно подобранном маршруте калибров толщина нанесенной на провод изоляции будет находиться в пределах, допускаемых техническими условиями на

эмалированные провода. Решение по уточнению маршрута калибров с целью экономии лака принимает технолог по производству эмаль-проводов.

Предлагаемая методика расчета калибров для эмалирования провода была использована на ЗАО «Сибкабель» при изготовлении провода ПЭТВ-2 диаметром 0,335, 0,80, и 1,0 мм и показала положительные результаты. Рассчитанные маршруты калибров обеспечили более равномерную толщину элементарных слоев лака, наносимых за каждый проход в процессе эмалирования, увеличение минимальных значений пробивного напряжения и механической прочности изоляции и как следствие — увеличение скорости эмалирования.

Выводы

При расчете маршрута калибров необходимо учитывать следующие требования:

1. Толщина наносимой пленки лака должна быть одинаковой по всем проходам для создания одинаковых условий поликонденсации.
2. Шаг ступени калибров $h = d_{i+1} - d_i$ должен быть одинаковым по всему маршруту.
3. Толщина твердого покрытия эмали, наносимая за каждый проход, равна шагу маршрута калибров $\delta_T = h = \delta_{ж} \cdot P$.
4. Толщина слоя жидкой эмали, наносимая на первом проходе, должна быть такой же, как и на остальных проходах.

А. В. Петров, доцент кафедры «Электроизоляционная и кабельная техника» Томского политехнического университета

Г.Н. Дзюбань, начальник эмальобмоточного производства ЗАО «Сибкабель»

О.Н. Елисеева, начальник технологического бюро эмальобмоточного производства ЗАО «Сибкабель»

Литература

1. Основы кабельной техники: Учебник для студентов высших учебных заведений / Леонов В.М., Пешков И.Б., Рязанов И.Б., Холодный С.Д. / 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.