

## АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТИ, ВОЗНИКАЮЩЕЙ ПРИ РАСЧЁТЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ОБМОТКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО АППАРАТА

Верхола А.В.

Донбасский государственный технический университет

Украина, 94204, Алчевск, просп. Ленина, 16, ДонГТУ, кафедра "Электрические машины и аппараты"

тел. (06442) 53746, факс (06442) 26887, E-mail: vav@usr.lg.ua, verkhola@mail.ru

*Рассмотрен механизм возникновения погрешности при расчёте электрического сопротивления обмотки электрического аппарата, питающейся постоянным током. Показано, что погрешность возникает из-за ошибки в определении средней длины витка обмотки при округлении количества слоёв обмоточного провода. Приведены зависимости погрешности от различных факторов. Предложен алгоритм расчёта, позволяющий исключить возникновение рассмотренной погрешности.*

*Розглянуто механізм виникнення погрешності при розрахунку електричного опору обмотки постійного струму електричного апарата. Показано, що погрешність виникає через помилку у визначенні середньої довжини витка обмотки при округленні кількості шарів обмотувального проводу. Наведено залежності погрешності від різних факторів. Запропоновано алгоритм розрахунку, що дозволяє виключити виникнення розглянутої погрешності.*

### ВВЕДЕНИЕ

Разработка и производство новых типов коммутационных аппаратов в Украине являются важными научным и практическим направлениями, призванными обеспечить потребности сельского хозяйства и промышленности в электрических аппаратах с высокими техническими характеристиками. Повышению качества и скорости разработки способствует использование при проектировании средств вычислительной техники. Современный проектировщик для расчёта электромеханических устройств может воспользоваться большим выбором алгоритмических языков и универсальных компьютерных программ. С их помощью можно достаточно легко запрограммировать расчётные соотношения известных методик. Такой подход позволяет быстро получить наглядный результат. Однако если методика расчёта разрабатывалась без учёта её реализации на компьютере, то, скорее всего, будет получен относительно невысокий уровень точности [1]. Низкий уровень точности в этом случае объясняется тем, что большинство инженерных методик расчёта электрических аппаратов были разработаны в то время, когда проектировщик имел в своём распоряжении скромный арсенал вычислительных средств. Такие методики для исключения громоздких вычислений содержат достаточно много упрощений, снижающих точность. Автор столкнулся с подобной проблемой при разработке методики расчёта электромагнитного привода синхронного вакуумного контактора (СВК) [2 - 6]. Было обнаружено, что электрическое сопротивление синхронизирующей обмотки некоторых экспериментальных образцов электромагнитов привода СВК существенно отличается от расчётного. Проведенный анализ показал, что обнаруженная погрешность возникает из-за упрощённого подхода к определению длины среднего витка обмотки в классической методике [7, 8]. После внесения в методику необходимых уточнений, погрешность уменьшилась и стабилизировалась. Более чем десятилетний опыт использования разработанной методики подтвердил правильность принятых

в ней решений и показал, что она может использоваться не только при расчёте обмоток СВК, но и при проектировании других электрических аппаратов, содержащих обмотки. Поскольку в работах [2 - 6] содержатся результаты исследований ориентированные на узкое использование при проектировании СВК, для расширения области применения разработанной методики представляется целесообразным выполнить более широкий анализ относительной погрешности, возникающей при расчёте электрического сопротивления обмотки.

### ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Цель проведенных в данной работе исследований - определение величины относительной погрешности, возникающей при расчёте электрического сопротивления обмотки электрического аппарата, в широком диапазоне изменения влияющих факторов.

### МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В известной методике расчёта электромагнита постоянного тока [7] электрическое сопротивление обмотки определяется по формуле:

$$R = \frac{4 \cdot \rho_{\vartheta} \cdot l_{\text{н\delta}} \cdot W}{\pi \cdot d_{\xi}^2}, \quad (1)$$

где  $\rho_{\vartheta}$  - удельное электрическое сопротивление материала обмоточного провода при температуре  $\vartheta$ ;  $W$  - количество витков обмотки;  $d_{\xi}$  - диаметр обмоточного провода с изоляцией;  $l_{\text{н\delta}}$  - длина среднего витка обмотки. Для электромагнитов с сердечником прямоугольного поперечного сечения:

$$l_{\text{н\delta}} = 2 \cdot (a + b + 4 \cdot l_{\xi 1}) + \pi \cdot h_1, \quad (2)$$

где  $a$  - ширина сердечника электромагнита;  $b$  - толщина пакета магнитопровода электромагнита;  $l_{\xi 1}$  - толщина изоляции между внутренней поверхностью обмотки и сердечником электромагнита (толщина каркаса) (рис. 1);  $h_1$  - высота обмотки

Высота обмотки определяется по формуле:

$$h_1 = n_{\text{н}\delta} \cdot d_{\text{э}}, \quad (3)$$

где  $n_{\text{н}\delta}$  - количество принятых слоёв обмотки.

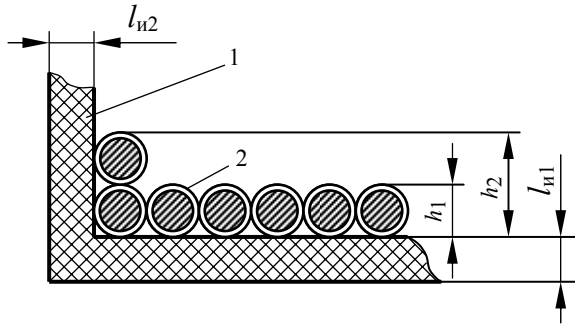


Рис. 1. К объяснению возникновения погрешности при расчёте по варианту А. Принимается  $h_1 = h_2$ :  
1 - каркас катушки; 2 - обмоточный провод

Как правило, наружный слой обмотки электромагнита оказывается неполным, и, при определении высоты  $h_1$ , необходимо решить, учитывать или нет его толщину. Для обмоток, выполненных из тонкого провода и имеющих большое количество слоёв, данный вопрос не является существенным, так как, в этом случае толщина одного слоя несоизмеримо мала по сравнению с высотой обмотки. Если обмотка содержит небольшое количество слоёв, намотанных проводом большого диаметра, то справедливо предположить, что округление числа слоёв в ту или иную сторону может стать причиной возникновения значительной погрешности при расчёте сопротивления провода обмотки. Возможны следующие варианты при определении количества слоёв обмотки.

Вариант А - образованием нового слоя считается появление хотя бы одного витка в этом слое. В этом случае для дальнейшего расчёта принимается число слоёв:

$$\begin{cases} n_{\text{н}\delta} = n + 1 & \text{и } \delta \neq 0 & n_{\delta} > n; \\ n_{\text{н}\delta} = n & \text{и } \delta \neq 0 & n_{\delta} = n, \end{cases} \quad (4)$$

где  $n$  - целое число слоёв;  $n_{\delta}$  - расчётное (не округлённое) число слоёв. Целое число слоёв определяется по формуле:

$$n = \left[ \frac{W}{W_1} \right], \quad (5)$$

где  $W_1$  - количество витков в одном полном слое обмотки:

$$W_1 = \left[ \frac{h_{\text{э}} - 2 \cdot l_{\text{э}2} \cdot k_{\text{т}} - 1}{d_{\text{э}}} \right], \quad (6)$$

где  $h_{\text{э}}$  - высота каркаса катушки (рис. 2);  $l_{\text{э}2}$  - толщина торцевой стенки каркаса катушки (рис. 1);  $k_{\text{т}}$  - коэффициент, учитывающий неплотность прилегания витков друг к другу.

Расчётное (не округлённое) число слоёв определяется по формуле:

$$n_{\delta} = \frac{W}{W_1}. \quad (7)$$

Вариант Б - образованием нового слоя считается

полное его заполнение. Принимаемое для расчёта количество слоёв:  $n_{\text{н}\delta} = n$ .

Вариант В - Принимаемое количество слоёв определяется по обычным правилам округления:

$$\begin{cases} n_{\text{н}\delta} = n & \text{и } \delta \neq 0 & n_{\delta} < n + 0.5; \\ n_{\text{н}\delta} = n + 1 & \text{и } \delta \neq 0 & n_{\delta} \geq n + 0.5 \end{cases} \quad (8)$$

Вариант Г. По формуле (5) определяется количество полных слоёв обмотки, а количество витков в неполном слое - по формуле:

$$W_1 = W - n \cdot W_{\text{н}}. \quad (9)$$

Определяется длина обмоточного провода:

$$L = W_{\text{н}} \cdot l_{\text{н}} + n \cdot (W_1 \cdot l_{\text{н}}), \quad (10)$$

где  $l_{\text{н}}$  - длина витка провода в неполном слое;  $l_{\text{н}}$  - средняя длина витка обмоточного провода в полных слоях.

При рядовой намотке:

$$l_{\text{н}} = 2 \cdot (a + b + 4 \cdot l_{\text{э}1}) + \pi \cdot n \cdot d_{\text{э}} \quad (11)$$

$$l_{\text{н}} = 2 \cdot (a + b + 4 \cdot l_{\text{э}1}) + \pi \cdot d_{\text{э}} \cdot (2 \cdot n + 1) \quad (12)$$

При шахматной намотке:

$$l_{\text{н}} = 2 \cdot (a + b + 4 \cdot l_{\text{э}1}) + \pi \cdot d_{\text{э}} \cdot \left( 1 + \frac{\sqrt{3} \cdot (n-1)}{2} \right) \quad (13)$$

$$l_{\text{н}} = 2 \cdot (a + b + 4 \cdot l_{\text{э}1}) + \pi \cdot d_{\text{э}} \cdot (3 + \sqrt{3} \cdot (n-1)) \quad (14)$$

Электрическое сопротивление провода обмотки:

$$R = \frac{4 \cdot \rho_{\text{г}} \cdot L}{\pi \cdot d^2}, \quad (15)$$

где  $d$  - диаметр провода обмотки без изоляции.

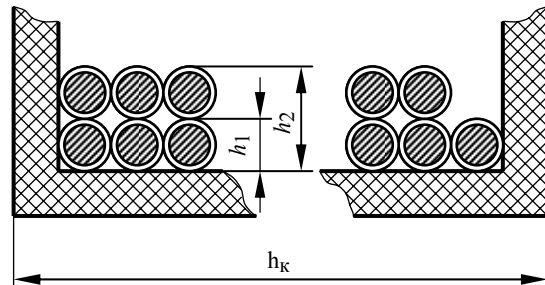


Рис. 2. К объяснению возникновения погрешности при расчёте по варианту Б. Принимается  $h_1 = h_1$

Если для определения количества слоёв используется вариант (А), то, очевидно, что при расчёте сопротивления обмотки по формуле (1) более точный результат будет получен, когда принимается  $h_1 = h_1$  (рис. 1). Если принять  $h_1 = h_2$ , то будет допущена погрешность, относительная величина которой составит:

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{|R_2 - R_1|}{R_1} \cdot 100\% = \\ &= \frac{\pi \cdot d_{\text{э}}}{2 \cdot (a + b + 4 \cdot l_{\text{э}1}) + \pi \cdot n_{\text{н}\delta} \cdot d_{\text{э}}} \cdot 100\%, \end{aligned} \quad (16)$$

где

$$R_1 = \frac{4 \cdot \rho_{\text{г}} \cdot W \cdot l_{\text{н}\delta 1}}{\pi \cdot d_{\text{э}}^2}$$

$$= \frac{4 \cdot \rho_g \cdot W \cdot (2 \cdot (a + b + 4 \cdot l_{\text{ср}1}) + \pi \cdot h_1)}{\pi \cdot d_{\text{ср}}^2}, \quad (17)$$

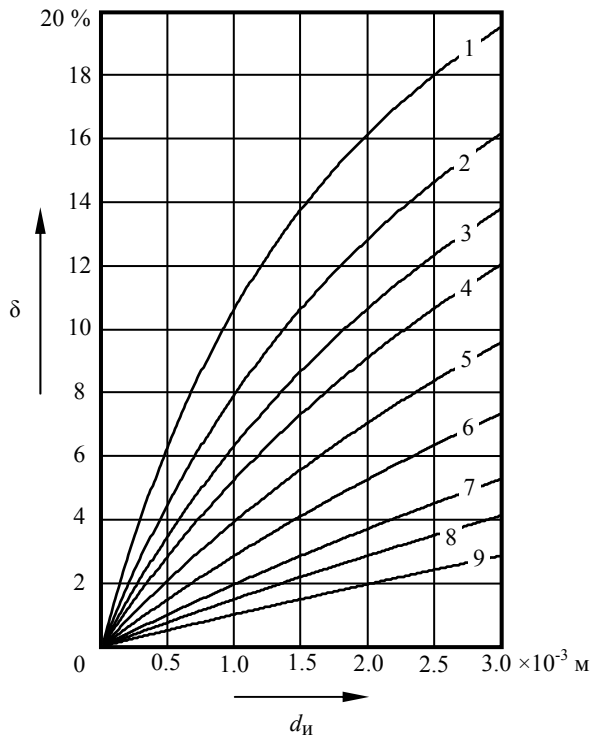
где  $l_{\text{ср}1}$  - длина среднего витка обмотки, если её высота принята равной  $h_1$ ;

$$R_2 = \frac{4 \cdot \rho_g \cdot W \cdot l_{\text{ср}2}}{\pi \cdot d_{\text{ср}}^2} = \frac{4 \cdot \rho_g \cdot W \cdot (2 \cdot (a + b + 4 \cdot l_{\text{ср}1}) + \pi \cdot h_2)}{\pi \cdot d_{\text{ср}}^2} \quad (18)$$

где  $l_{\text{ср}2}$  - длина среднего витка обмотки, если её высота принята равной  $h_2$ .

С использованием формулы (16) получены зависимости относительной погрешности от различных факторов (рис. 3, 4, 6 и 7).

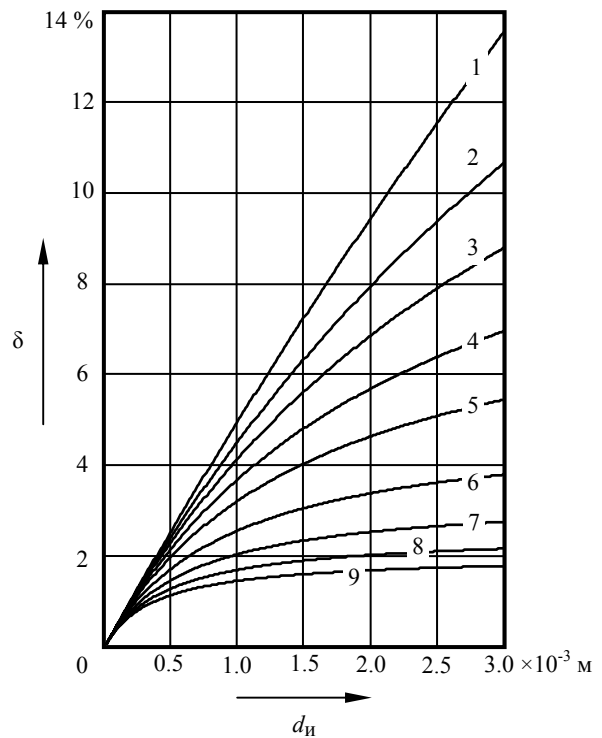
Величина погрешности при определении количества слоёв по варианту (Б) такая же, а по варианту (В) приблизительно в два раза меньше, чем в случае использования варианта (А). При использовании предложенного автором варианта (Г) рассмотренная погрешность не возникает вообще.



Значения внутреннего периметра обмотки  $D$  обозначены следующим образом:

1 - 0.02 м;	2 - 0.03 м;	3 - 0.04 м;
4 - 0.05 м;	5 - 0.07 м;	6 - 0.1 м;
7 - 0.15 м;	8 - 0.2 м;	9 - 0.3 м.

Рис. 3. Зависимость погрешности от диаметра обмоточного провода с изоляцией  $d_w$  и внутреннего периметра обмотки  $D$



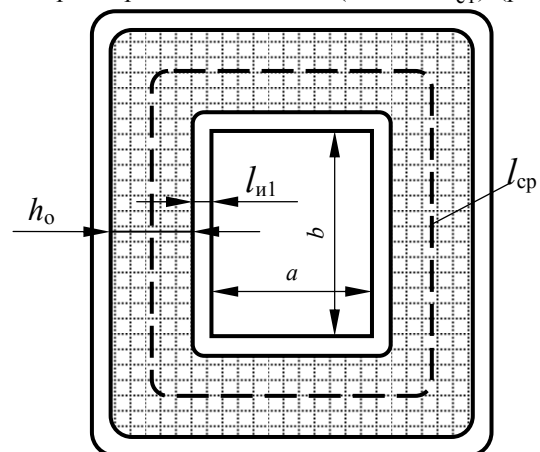
Принятое количество слоёв обмоточного провода:  
 1 - 1 слой; 2 - 3 слоя; 3 - 5 слоёв;  
 4 - 8 слоёв; 5 - 12 слоёв; 6 - 20 слоёв;  
 7 - 30 слоёв; 8 - 40 слоёв; 9 - 50 слоёв.

Рис. 4. Зависимость погрешности от диаметра обмоточного провода с изоляцией  $d_w$  и принятого количества слоёв  $n_{\text{пр}}$

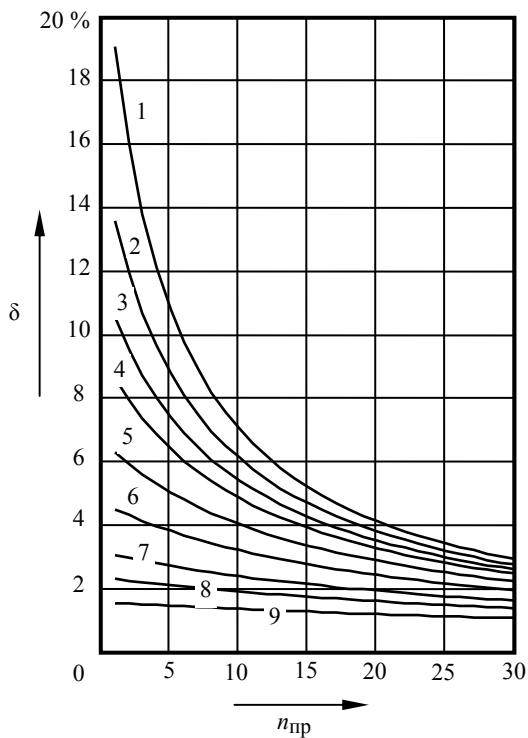
## ВЫВОДЫ

Анализируя выражение (16) и зависимости, приведенные на рис. 3, 4, 6 и 7, можно сделать следующие выводы:

1. При расчёте по классической методике погрешность  $\delta$  увеличивается с уменьшением внутреннего периметра обмотки  $D = 2 \cdot (a + b + 4 \cdot l_{\text{ср}1})$  (рис. 5).



$a$  - ширина сердечника магнитопровода;  $b$  - толщина пакета магнитопровода;  $h_o$  - высота обмотки;  $l_{\text{ср}1}$  - толщина каркаса катушки;  $l_{\text{ср}}$  - длина среднего витка  
 Рис. 5. К определению внутреннего периметра обмотки



Значения внутреннего периметра обмотки  $D$ :  
 1 - 0.02 м; 2 - 0.03 м; 3 - 0.04 м;  
 4 - 0.05 м; 5 - 0.07 м; 6 - 0.1 м;  
 7 - 0.15 м; 8 - 0.2 м; 9 - 0.3 м.

Рис. 6. Зависимость погрешности от принятого количества слоёв провода  $n_{пр}$  и внутреннего периметра обмотки  $D$

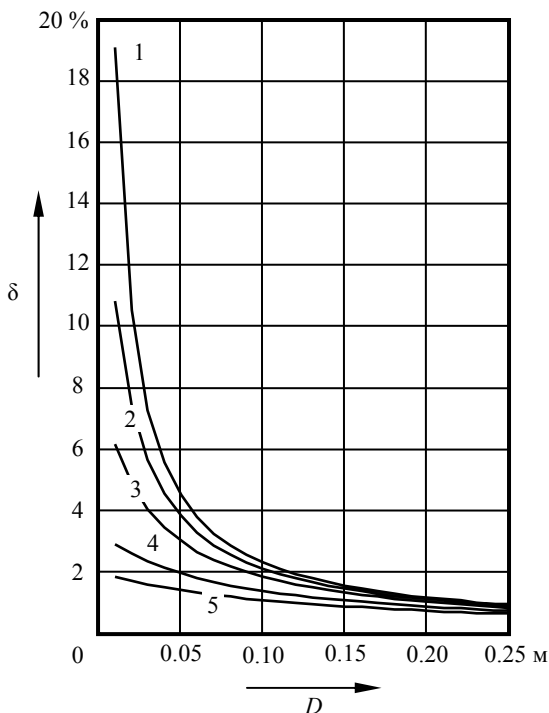


Рис. 7. Зависимость погрешности от внутреннего периметра обмотки  $D$  и принятого количества слоёв провода  $n_{пр}$

Принятое количество слоёв обмоточного провода:  
 1 - 1 слой; 2 - 3 слоя; 3 - 5 слоёв;  
 4 - 8 слоёв; 5 - 12 слоёв; 6 - 20 слоёв;  
 7 - 30 слоёв; 8 - 40 слоёв; 9 - 50 слоёв.

2. Погрешность  $\delta$  увеличивается с ростом диаметра обмоточного провода  $d_{\delta}$ .

3. Погрешность  $\delta$  увеличивается с уменьшением количества слоёв обмотки.

4. Погрешность  $\delta$  увеличивается с увеличением количества витков в одном слое  $W_1$ .

По зависимостям (рис. 3, 4, 6 и 7) можно установить, что в наиболее неблагоприятных случаях величина погрешности может достигать 19%. Использование алгоритма расчёта, предложенного в данной статье (вариант Г), позволяет избежать появления погрешности, обусловленной округлением при расчёте длины среднего витка.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Птах Г.К. Методологические аспекты разработки компьютерных моделей электромеханических преобразователей // Изв. вузов. Электромеханика. – 2003. - № 1. С. 7 – 11.
- [2] Таев И.С., Акимов Е.Г., Верхола А.В. Методика расчёта быстродействующего электромагнитного привода синхронного вакуумного контактора // МКЭЭ - 94: Тезисы докладов I Международной конференции по электромеханике и электротехнологии, Суздаль, 13 - 16 сентября 1994 г. - Ч. II. - С. 206.
- [3] Верхола А.В. Методика расчёта обмоточных данных электромагнитного привода синхронного вакуумного контактора / Донбас. горно - металлург. ин-т. - Алчевск, 1995. - 26 с.: ил. - Деп. в ГНТБ Украины 13.06.95, № 1495 - Ук95.
- [4] Верхола А.В. Математическая модель динамики отключения электромагнитного привода синхронного вакуумного контактора // Электромеханика. Теория и практика: Труды научно-технической конференции, посвящённой 100-летию со дня рождения выдающегося украинского учёного-электромеханика Тихона Губенко. - Львов, 25 - 28 сентября 1996 г. - Львов, 1996. - С. 28-29.
- [5] Верхола А.В., Ткаченко Ю.С. Интерактивный программный модуль для реализации лабораторных работ по курсам "Инженерное проектирование и САПР электрических аппаратов" и "Математическое моделирование электрических аппаратов" // МКЭЭ - 94: Тезисы докладов I Международной конференции по электромеханике и электротехнологии, Суздаль, 13 - 16 сентября 1994 г. - Ч. I. - С. 202.
- [6] Верхола А.В. Расчёт динамики включения и отключения электромагнитного привода синхронного вакуумного контактора // Вестник ХГПУ. - Харьков: ХГПУ. - 2000. - Вып. 81. - С. 73 – 76.
- [7] Гордон А.В., Сливинская А.Г. Электромагниты постоянного тока. - М., - Л.: Госэнергоиздат, 1960. - 447 с.
- [8] Ротерс. Электромагнитные механизмы. - М. - Госэнергоиздат, 1949. - 523 с.

Поступила 20.09.2004