

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ НАГРУЗКИ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ СОВМЕЩЕННЫХ ОБМОТОК

В. М. Павлинин, Ю. В. Барышников, Н. С. Сиунов

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин  
и общей электротехники)

Последние годы все большее внимание уделяется синтезу электрических машин. В одном магнитопроводе объединяются две (или более) электрические машины с разным числом полюсов и взаимно неиндуктивными обмотками.

В ряде случаев две взаимно неиндуктивные обмотки таких машин могут быть электрически совмещены. Известны совмещенные обмотки в одномашинных преобразователях частоты [1, 2, 3], бесконтактных синхронных машинах [4], каскадных возбудителях переменного тока для бесщеточного возбуждения синхронных машин [5], асинхронных двигателях для двухтокового питания [6] и ряде других устройств. Совмещение обмоток, по мнению всех исследователей, приводит к повышению коэффициента использования машины.

Однако при оценке эффективности совмещения часто не учитываются такие существенные детали, как уменьшение обмоточных коэффициентов, вынужденное соотношение чисел витков совмещаемых обмоток, изменение длины лобовых частей, а также условия сохранения параметров и характеристик проектируемых машин. Не определяются границы, при которых замена двух обмоток одной становится нецелесообразной.

Анализ большого числа схем совмещенных обмоток показывает, что принцип их образования может быть сведен в основном к двум типичным случаям, представленным на рис. 1. В том и другом случаях

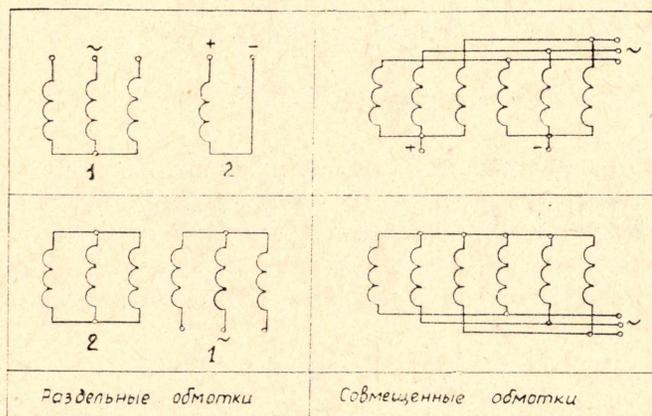


Рис. 1. Принципиальные схемы обмоток

совмещаются две обмотки. Одна из них является «первичной» (индекс 1), например, 3-фазная обмотка двигателя или генератора с заданными значениями напряжения или э. д. с. Другая — «вторичная» (индекс 2) с заданной величиной ампервитков. Выбор обмоточных данных первичной обмотки производится в соответствии с требуемыми параметрами, что определяется отношением линейной нагрузки к индукции в воздушном зазоре  $A/V\delta$ . Обмоточные данные «вторичной» цепи в совмещенной обмотке при этом получают вынужденными.

При выборе электромагнитных нагрузок и при оценке эффективности совмещенной обмотки необходимо также исходить из того, что при замене двух отдельных обмоток одной совмещенной должны сохраняться на прежнем уровне нагрев, потери и к. п. д. агрегата.

### Выбор плотности тока и линейных нагрузок

Из условия равенства удельных электрических потерь на единицу цилиндрической поверхности рашотки статора машин с отдельными и совмещенными обмотками следует, что

$$A_1\Delta_1 + A_2\Delta_2 = A_c\Delta_{c\beta}. \quad (1)$$

Здесь

$A_1, A_2, \Delta_1$  и  $\Delta_2$  — линейные нагрузки и плотности токов отдельных обмоток, определяемые по методике, изложенной в [7];

$A_c$  и  $\Delta_{c\beta}$  — эффективная линейная нагрузка и плотность тока совмещенной обмотки; индекс « $\beta$ » соответствует условию сохранения удельных электрических потерь при замене отдельных обмоток одной совмещенной.

Эффективная линейная нагрузка

$$A_c = \frac{u_{пс} I_c}{t}, \quad (2)$$

где

$u_{пс}$  — число эффективных проводников совмещенной обмотки в пазу;

$t$  — зубцовое деление;

$I_c$  — эффективный ток в проводнике.

$$I_c = \sqrt{I_{1c}^2 + I_{2c}^2}. \quad (3)$$

Здесь  $I_{1c}$  и  $I_{2c}$  — токи первичного и вторичного контуров, протекающие в одном и том же проводнике совмещенной обмотки.

Подставляя (3) в (2), получим, что

$$A_c^2 = A_{1c}^2 + A_{2c}^2. \quad (4)$$

Из (1) с учетом (4) эффективная плотность тока

$$\Delta_{c\beta} = \frac{A_1\Delta_1 + A_2\Delta_2}{\sqrt{A_{1c}^2 + A_{2c}^2}}. \quad (5)$$

Выразим  $A_{1c}$  и  $A_{2c}$  совмещенной обмотки через  $A_1$  и  $A_2$  соответствующих отдельных обмоток, исходя из следующих условий.

1. Для сохранения параметров и характеристик, при замене двух отдельных обмоток одной совмещенной, первичная цепь последней должна проектироваться таким образом, чтобы выполнялось равенство:

$$\frac{A_1}{B_{\delta 1}} = \frac{A_{1c}}{B_{\delta 1c}}. \quad (6)$$

Отсюда, раскрывая выражения  $A$  и  $B\delta$ , получим, что число витков первичной цепи совмещенной обмотки

$$w_{1c} = w_1 \sqrt{\frac{K_{01}}{K_{01c}}}, \quad (7)$$

и при равенстве мощности

$$A_{1c} = A_1 \sqrt{\frac{K_{01}}{K_{01c}}}. \quad (8)$$

Здесь и далее  $k_0$  — обмоточный коэффициент соответствующей обмотки.

2. Для вторичных цепей, число витков которых в совмещенной обмотке не может быть выбрано произвольно, необходимо обеспечить равенство намагничивающих сил  $F_{2c} = F_2$ . Из него получим:

$$A_{2c} = A_2 \frac{K_{02}}{K_{02c}}. \quad (9)$$

В большинстве случаев приближенно можно считать, что  $\Delta_1 \approx \Delta_2 = \Delta$ . Тогда из (5) с учетом (8) и (9), обозначив

$$\frac{A_2}{A_1} = a, \quad \frac{K_{01}}{K_{01c}} = k_1 \quad \text{и} \quad \frac{K_{02}}{K_{02c}} = k_2,$$

получим отношение плотности тока в совмещенной обмотке к плотности тока в отдельных обмотках при равенстве удельных потерь

$$\frac{\Delta_{c\beta}}{\Delta} = \frac{1 + a}{\sqrt{k_1 + k_2^2 a^2}}. \quad (10)$$

В первом приближении можно считать, что отношение обмоточных коэффициентов  $k_1 \approx 1$ . Анализ совмещенных обмоток показывает, что это допущение дает весьма малую погрешность при отношении чисел пар полюсов совмещаемых машин, равном любому четному числу или нечетному числу больше пяти.

Во вторичной цепи обмоточные данные получаются вынужденными, поэтому в ряде случаев обмоточный коэффициент  $k_{02c}$  может значительно отличаться от  $k_{02}$  и их отношение  $k_2$  не равно единице.

В идеализированном случае при  $k_1 = k_2 = a = 1$  плотность тока  $\Delta_{c\beta} = \sqrt{2} \Delta$ . При  $a \neq 1$ , но  $k_1 = k_2 = 1$  получим

$$\frac{\Delta_{ck}}{\Delta} = \frac{1 + a}{\sqrt{1 + a^2}}. \quad (11)$$

Зависимость  $\frac{\Delta_{ck}}{\Delta} = f(a)$  приведена на рис. 2.

Учитывая, что в действительности  $k_2 \neq 1$ , из (10) и (11) получим

$$\Delta_{c\beta} = \Delta_{ck\beta}. \quad (12)$$

где

$$\beta = \frac{\Delta_{c\beta}}{\Delta_{ck}} = \sqrt{\frac{1 + a^2}{1 + k_2^2 a^2}}.$$

Семейства кривых  $\beta = f(k_2)$  при разных значениях отношения линейных нагрузок  $a$  приведены на рис. 3.

Выбор плотности тока по (10) или по графикам рис. 2 и 3 в соответствии с (12) обеспечивает постоянство удельных потерь на единицу цилиндрической поверхности расточки статора. Однако при этом не сохраняется равенство потерь в меди, так как лобовая часть совмещенной обмотки по сравнению с одной из отдельных либо удлиняется,

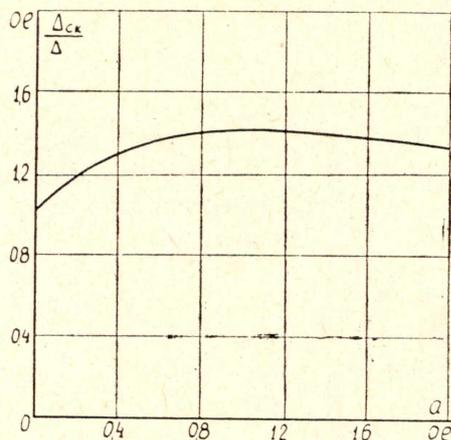


Рис. 2. Относительная плотность тока в функции отношения линейных нагрузок в идеализированном случае ( $k_1=k_2=1$ ) при равенстве удельных электрических потерь

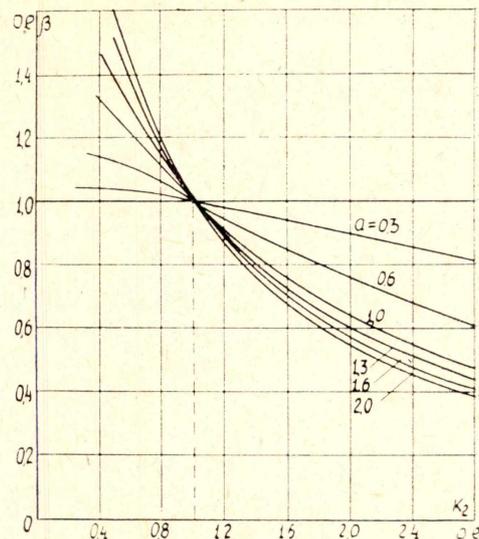


Рис. 3. Коэффициент  $\beta$ , учитывающий неравенство обмоточных коэффициентов

либо укорачивается. Как показано ниже, для сохранения потерь в меди при одинаковой мощности плотность тока в совмещенной обмотке должна определяться по уравнению

$$\frac{\Delta_{с\epsilon}}{\Delta} = \frac{\xi_1 + \xi_2 a}{\sqrt{k_1 + k_2^2 a^2}}, \quad (13)$$

где

$$\xi_1 = \frac{l_{ср1}}{l_{ср\epsilon}} \quad \text{и} \quad \xi_2 = \frac{l_{ср2}}{l_{ср\epsilon}}$$

— отношения средних длин полувитка соответствующих отдельных и совмещенной обмоток.

Из (10) и (13) найдем

$$\Delta_{с\epsilon} = \Delta_{с\beta} \cdot \epsilon, \quad (14)$$

где

$$\epsilon = \frac{\Delta_{с\epsilon}}{\Delta_{с\beta}} = \frac{\xi_1 + \xi_2 a}{1 + a}.$$

Семейство кривых  $\epsilon=f(a)$  для различных значений  $\xi_1$  и  $\xi_2$  представлено на рис. 4. Значения  $\epsilon$  вычислены в предположении, что один из коэффициентов ( $\xi_1$  или  $\xi_2$ ) равен единице. Например, если шаг совмещенной обмотки близок к шагу первичной отдельной обмотки, то  $\xi_1 \approx 1$ . Другой коэффициент ( $\xi_2$ ) при этом может значительно отличаться от единицы в ту или другую сторону, поскольку вторая из совмещаемых обмоток может иметь меньшее или большее число полюсов и, соответственно, удлиненные или укороченные лобовые части.

При удлиненной лобовой части совмещенной обмотки по сравнению с одной из отдельных коэффициент  $\epsilon < 1$ .

На рис. 5 приведены критические значения отношения обмоточных коэффициентов  $k_{кр}$ , при которых  $\frac{\Delta_{с\epsilon}}{\Delta} = 1$ . Значения  $k_{кр}$  для различных  $\xi_1$  и  $\xi_2$  определяются из (13).

$$k_{2 кр} = \frac{1}{a} \sqrt{(1 + \xi_2 a)^2 - 1} \quad \text{при } \xi_1 = 1; \quad (15)$$

$$k_{2 кр} = \frac{1}{a} \sqrt{(\xi_1 + a)^2 - 1} \quad \text{при } \xi_2 = 1.$$

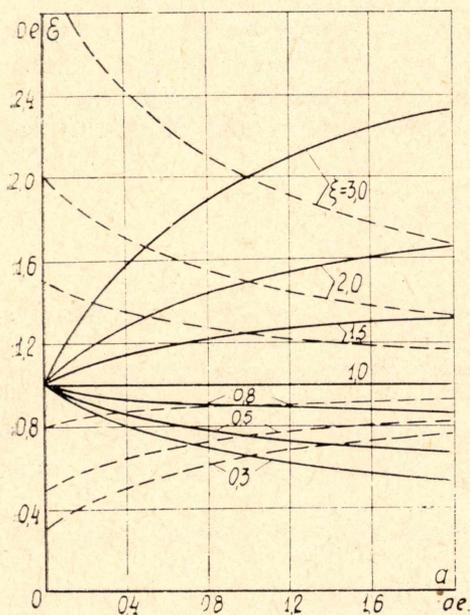


Рис. 4. Коэффициент  $\epsilon$ , учитывающий изменение длин лобовых частей при равенстве полных потерь в меди отдельных и совмещенной обмоток

— — —  $\xi_1 = 1, \xi_2 \neq 1$   
 - - -  $\xi_2 = 1, \xi_1 \neq 1$

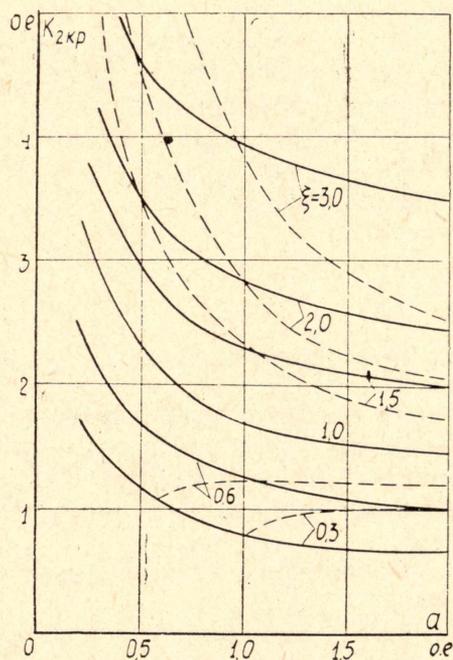


Рис. 5. Критические значения отношения обмоточных коэффициентов  $k_{кр}$  в функции отношения линейных нагрузок.

— — —  $\xi_1 = 1, \xi_2 \neq 1$   
 - - -  $\xi_2 = 1, \xi_1 \neq 1$

Очевидно, что при  $k_2 > k_{2 кр}$  замена отдельных обмоток одной совмещенной с точки зрения расхода меди становится нецелесообразной.

Таким образом, приведенные соотношения позволяют выбрать оптимальную схему совмещенной обмотки и определить плотность тока в ней при условии сохранения мощности и потерь в меди. При  $k_1 \approx 1$  плотность тока может быть найдена графически по кривым рис. 2, 3 и 4 в соответствии с уравнением

$$\frac{\Delta_{с\epsilon}}{\Delta} = \frac{\Delta_{ск}}{\Delta} \beta \cdot \epsilon \quad (16)$$

### Сравнение веса меди, мощности и габаритов

Оценим расход проводникового материала в машине с отдельными и с совмещенной обмотками при условии равенства потерь в меди.

Преобразуя формулу для определения электрических потерь  $P_m$  таким образом, чтобы в нее вошли плотность тока  $\Delta$  и вес меди  $G$  и

принимая удельный вес меди 8,9 кг/дм<sup>3</sup>, а удельное сопротивление при 75°C  $0,02135 \frac{\text{ОМ} \cdot \text{мм}^2}{\text{М}}$ , получим

$$p_M = 2,4 \Delta^2 G_{\text{вм}}. \quad (17)$$

Здесь размерность  $\Delta$  — а/мм<sup>2</sup>;  $G$  — кг.

Тогда, полагая  $\Delta_1 \approx \Delta_2 = \Delta$ , запишем отношение потерь в меди отдельных и совмещенной обмоток:

$$\frac{P_{M1} + P_{M2}}{P_{Mc}} = \left( \frac{\Delta}{\Delta_c} \right)^2 \frac{G}{G_c}, \quad (18)$$

где

$G = G_1 + G_2$  — сумма весов меди двух отдельных обмоток.

Уравнение (18) позволяет оценить уменьшение расхода меди при сохранении электрических потерь или уменьшение потерь, если вес меди при замене двух обмоток одной совмещенной не изменяется. При выборе плотности тока из условия неизменности электрических потерь отношения весов меди

$$\frac{G}{G_c} = \left( \frac{\Delta_{ce}}{\Delta} \right)^2. \quad (19)$$

Как видно из рис. 2, 3, 4, величина  $\frac{\Delta_{ce}}{\Delta}$  может быть больше или меньше единицы в зависимости от отношений линейных нагрузок, обмоточных коэффициентов и средних длин полувитка. При рациональном проектировании и выборе схемы совмещенной обмотки расход меди может быть значительно уменьшен по сравнению с отдельным исполнением.

Рассмотрим влияние электрического совмещения на мощность агрегата.

Пусть совмещенная обмотка укладывается в те же пазы, где размещались две отдельные обмотки. Тогда площадь паза  $S_{\text{пс}} = S_{\text{п}}$ . Выражая  $S_{\text{п}}$  через число эффективных проводников в пазу  $u_{\text{п}}$ , их сечение  $Q$  и коэффициент заполнения паза медью  $k_3$ , получим

$$\frac{u_{\text{пс}} Q_{\text{сст}}}{k_{3c}} = \frac{u_{\text{п1}} Q_1 + u_{\text{п2}} Q_2}{k_3}. \quad (20)$$

Здесь в соответствии с (7)

$$u_{\text{пс}} = u_{\text{п1}} \frac{\sqrt{k_1}}{\alpha_1}, \quad (21)$$

где

$\alpha_1 = \frac{a_1}{a_{1c}}$  — отношение чисел параллельных ветвей первичных цепей отдельной и совмещенной обмоток.

Из условия (20) определяется максимально возможное сечение эффективного проводника совмещенной обмотки, закладываемой в тот же паз

$$Q_{\text{сст}} = \frac{k_{3c}}{k_3} \frac{\alpha_1}{\sqrt{k_1}} \left( Q_1 + \frac{u_{\text{п2}}}{u_{\text{п1}}} Q_2 \right). \quad (22)$$

Из условия допустимого нагрева при заданном токе  $I_c$  и выбранной по (16) плотности тока  $\Delta_{ce}$  необходимое сечение эффективного проводника

$$Q_c = \frac{I_c}{\Delta_{ce}}. \quad (23)$$

Для сравнения с  $Q_{см}$  выразим  $Q_c$  через сечения  $Q_1$  и  $Q_2$  отдельных обмоток, полагая, что расчетные мощности при замене двух обмоток одной остаются неизменными. Из последнего следует, что

$$I_{1c} = I_1 \alpha_1 \quad \text{и} \quad I_{2c} = I_2 \frac{K_2}{\sqrt{K_1}} \frac{u_{п}}{u_{п1}} \alpha_1.$$

По (3) и (23), выражая ток как произведение его плотности на сечение, получим

$$Q_c = \frac{\Delta}{\Delta_{св}} \frac{\alpha_1}{\sqrt{K_1}} \sqrt{K_1 Q_1^2 + K_2^2 Q_2^2 \left( \frac{u_{п2}}{u_{п1}} \right)^2}. \quad (24)$$

Отношение максимально возможного по условию укладки в паз сечения  $Q_{см}$  к сечению  $Q_c$  равно

$$k_Q = \frac{Q_{см}}{Q_c}. \quad (25)$$

Подставим в (25) выражения (22) и (24) и выражая в последних

$$Q = \frac{At}{u_{п} \Delta}, \quad (26)$$

с учетом (11) и (16) получим

$$k_Q = \left( \frac{\Delta_{ск}}{\Delta} \right)^2 \beta^2 \varepsilon \frac{K_{зс}}{K_3}. \quad (27)$$

Аналогично из уравнения (19) с учетом (21), (24) и (26), выражая отношение весов через числа эффективных проводников в пазу, их сечения и средние длины полувитка, получаем вышеприведенное соотношение (13).

Практически использование максимального сечения  $Q_{см}$  возможно при некоторой новой плотности тока  $\Delta_{см}$ , при которой потери в совмещенной обмотке сохраняются на уровне отдельных обмоток. Приравняв (18) единице, получим

$$\left( \frac{\Delta_{см}}{\Delta} \right)^2 = \frac{G}{G_{см}},$$

где  $G_{см} = G_c k_Q$  — вес меди при максимальном сечении. С учетом (16), (19) и (27)

$$\frac{\Delta_{см}}{\Delta} = \sqrt{\varepsilon \frac{K_3}{K_{зс}}}. \quad (28)$$

При максимальном сечении  $Q_{см}$  допустимое из условий нагрева увеличение тока и мощности совмещенной обмотки определится по следующему соотношению:

$$k_p = \frac{I_{см}}{I_c} = \frac{P_{см}}{P_c} = \frac{Q_{см} \Delta_{см}}{Q_c \Delta_{св}},$$

что после преобразований дает

$$k_p = \frac{\Delta_{ск}}{\Delta} \beta \sqrt{\varepsilon \frac{K_{зс}}{K_3}} = \sqrt{k_Q}. \quad (29)$$

Коэффициент  $k_p$  позволяет оценить эффективность замены двух обмоток одной уже в начальной стадии проектирования. Однако при этой оценке необходимо учитывать, что увеличение мощности за счет тока может привести к недопустимому изменению линейных нагрузок, параметров и характеристик.

Представляет интерес сравнение габаритов машин одинаковой мощности с раздельными и совмещенными обмотками.

Для сечения  $Q_c$ , определяемого по (23), требуемая площадь паза

$$S_{\text{пс}} = \frac{u_{\text{пс}} Q_c}{k_{3c}}.$$

Отсюда с учетом (20) коэффициент уменьшения площади паза

$$k_s = \frac{S_{\text{пс}}}{S_{\text{п}}} = \frac{Q_c}{Q_{\text{см}}} = \frac{1}{k_Q}. \quad (30)$$

Иследуем влияние  $k_s$  на основные размеры электромагнитного ядра. При этом предположим, что паз имеет прямоугольную форму, длина сердечника статора не изменяется.

Обозначим:

$b_n, b_z$  — ширина паза и зубца;

$h_n$  — высота паза;

$D, D_a$  — внутренний и внешний диаметры статора.

Для сохранения уровня насыщения, параметров и характеристик геометрические размеры должны быть изменены таким образом, чтобы остались постоянными:

- 1) магнитный поток  $\Phi_c = \Phi$ ,
- 2) индукция в зубце  $B_{zc} = B_z$ ,
- 3) индукция в ярме  $B_{ac} = B_a$ .

Из первого условия следует, что индукции в воздушном зазоре

$$\frac{B_{\delta c}}{B_{\delta}} = \frac{D}{D_c}. \quad (31)$$

Из первого и второго условий по известным соотношениям с учетом (31) получим

$$\frac{D_c}{D} = 1 - \frac{b_n - b_{\text{пс}}}{t}. \quad (32)$$

Из первого и третьего условий найдем, что разность внешнего и внутреннего диаметров статора при совмещенной обмотке

$$D_{ac} - D_c = (D_a - D) - 2(h_n - h_{\text{пс}}). \quad (33)$$

Подставляя (32) в (33) и полагая, что размеры паза по высоте и ширине изменяются пропорционально

$$\frac{h_{\text{пс}}}{h_n} = \frac{b_{\text{пс}}}{b_n} = \sqrt{k_s},$$

после преобразований найдем отношение

$$\frac{D_{ac}}{D_a} = 1 - \left(1 - \sqrt{k_s}\right) \left(\frac{D}{D_a} \frac{b_n}{t} + \frac{2h_n}{D_a}\right). \quad (34)$$

Выражение в скобках содержит отношение известных величин для машины с раздельными обмотками. Приблизительно для 4-полюсных асинхронных машин, являющихся в большинстве случаев базисными при объединении двух машин в одном магнитопроводе, уравнение (32) можно представить в виде

$$\frac{D_{ac}}{D_a} \approx 1 - 0,5(1 - \sqrt{k_s}). \quad (35)$$

Аналогичный анализ для ротора при тех же условиях и неизменном диаметре вала дает отношение приращений ширины паза к высоте

$$\frac{b_{\text{пр}} - b_{\text{прс}}}{h_{\text{пр}} - h_{\text{прс}}} = \frac{6,28}{z_p}, \quad (36)$$

где  $z_p$  — число пазов ротора.

Оценку эффективности замены двух обмоток одной совмещенной рассмотрим на примере одномашинного преобразователя частоты ОПЧ-200-5, выпускаемого Ярославским электромеханическим заводом [8]. В этом преобразователе в одной магнитной системе объединены две асинхронные трехфазные машины с отдельными обмотками при отношении чисел полюсов 1:3.

Обмотки ротора ОПЧ-200-5: двигательная трехфазная короткозамкнутая и трехфазная генераторная могут быть заменены одной совмещенной. Принципиальные схемы построения фазы обмоток ротора приведены на рис. 6.

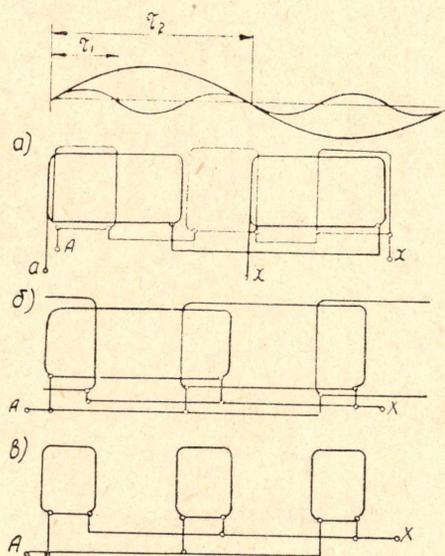


Рис. 6. Принцип совмещения роторных обмоток преобразователя ОПЧ-200-5 (для одной фазы двигателя и генератора); сверху вниз — отдельные обмотки, совмещенная обмотка с удлиненными лобовыми частями, то же с укороченными

Расчеты ОПЧ-200-5 по приведенной методике показали (табл. 1), что расход меди в роторе при совмещении двух обмоток в одной при одинаковых электрических потерях уменьшается в 1,53 раза при удлиненных лобовых частях и в 1,88 раза при укороченных. В тех же пазах ротора его мощность можно было бы увеличить соответственно в 1,37 и в 1,24 раза или при неизменной мощности уменьшить диаметр ротора на 30 и 20 мм.

### Выводы

1. Предлагаемая методика позволяет в начальной стадии проектирования оценить целесообразность и эффективность замены двух обмоток одной совмещенной.

2. Учет приведенных соотношений обеспечивает оптимальный выбор схемы совмещенной обмотки и выбор ее электромагнитных нагрузок, заданный уровень потерь, параметров и характеристик.

Таблица 1

**Основные расчетные данные отдельных и совмещенной обмоток ротора ОПЧ-200-5**

№, №	Наименование величины	Обозначения	Раздельные обмотки		Совмещенная обмотка с лобовыми частями			
					удлиненными		укороченными	
			генера-тора	двигателя	генератор	двигатель	генера-тор	двигатель
1.	Обмоточные коэффициенты	$k_0$	0,94	0,82	0,85	0,96	0,85	0,59
2.	Число параллельных ветвей	$a$	1	1	3	1	3	1
3.	Линейная нагрузка, а/см	$A$	97	114,6	103	98	103	159
4.	Средняя длина полу-витка, см	$l_{cp}$	28	40		41		28
5.	Эфф. проводников в пазу	$u_n$	8	4		26		26
6.	Сечение эфф. проводника, мм <sup>2</sup>	$Q$	2,63	6,93		1,05		1,3
7.	Плотность тока, а/мм <sup>2</sup>	$\Delta$	6	5,4		7,1		7,7
8.	Относительная плотность тока	$\Delta_{ce} / \Delta$	—	—		1,24		1,37
9.	Вес меди, кг	$G$	2,53	4,73		4,75		3,85
10.	Относит. вес меди	$G/G_c$	—	—		1,53		1,88
11.	Коэффициент увелич. мощности ротора в том же габарите	$k_p$	—	—		1,37		1,24
12.	Диаметр (внутр.) статора при неизменной мощности, мм	$D$		200		170		180

## ЛИТЕРАТУРА

1. В. С. Новокшенов. Некоторые вопросы теории асинхронного бесщеточного преобразователя частоты. «Изв. Томского политехнического института», т. 94, 1958.
2. В. И. Попов. Бесконтактный одномашинный умножитель частоты с двумя парами совмещенных обмоток, Труды III Всесоюзной конференции по бесконтактным электрическим машинам, вып. 2, Рига, 1966.
3. Ю. В. Барышников, В. М. Павлинин. Одномашинный преобразователь частоты с одной совмещенной обмоткой на роторе. Труды Уральского политехнического института им. С. М. Кирова, сб. 138, 1964, Свердловск.
4. Ю. В. Барышников, А. Т. Пластун. Бесконтактный синхронный двигатель с совмещенными обмотками. Состояние и перспективы развития полупроводникового возбуждения синхронных двигателей (труды конференции). НТОЭП, 1966, Свердловск.
5. А. Т. Пластун. Исследование и разработка системы бесщеточного возбуждения синхронных генераторов малой и средней мощности с каскадным асинхронно-синхронным возбудителем. Кандидатская диссертация, 1967, Свердловск, УПИ.
6. Ю. В. Барышников, А. Т. Пластун, Н. С. Сиунов. Асинхронный короткозамкнутый электродвигатель с совмещенной обмоткой на статоре, ПНТПО № 17-67-1668/93, ГОСИНТИ, М., 1967.
7. В. М. Павлинин, Н. С. Сиунов. Оптимальные размеры и электромагнитные нагрузки одномашинного преобразователя частоты. Изв. вузов, «Электромеханика», 1962, № 12.
8. Преобразователи асинхронные одномашинные повышенной частоты ОПЧ-200-5, Информационный лист ЯЭМЗ, 1966.