

Электрические машины с высокоэнергoeffективными совмещенными обмотками звезда-треугольник

Аннотация – Совмещенные обмотки обладают более высоким общим обмоточным коэффициентом и генерируют меньшую гармоническую составляющую. Таким образом, можно повысить эффективность двигателя без увеличения его активной массы. В данной статье рассматриваются характерные особенности совмещенных обмоток, внимательно изучены вопросы более высокой энергоэффективности в сравнении с классическими машинами того же размера, а также проектирование и расчет совмещенных обмоток, технология намотки и экспериментальные результаты для 30 кВт стандартного асинхронного двигателя.

Ключевые слова: машины переменного тока, катушки, электромашины, потери электроэнергии, статор.

I. Введение

Сама по себе идея совмещения обмоток довольно стара. Наиболее ранней публикацией является патент Korthals [1] 1918 года. То есть, к настоящему моменту, срок патентной защиты этого технического решения уже истёк. К преимуществам совмещенных обмоток относятся меньшие потери в проводниках статора и меньшая гармоническая составляющая. Вследствие этого снижаются потери в роторе и пульсации момента. Auinger [2] заявляет, что совмещенные обмотки также уменьшают градиент напряжения в лобовых частях обмоток. Совмещенные обмотки также могут использоваться для

повышения индукции или рабочего напряжения с помощью изменения схемы соединения выводных концов [3]. В данной статье будет исследовано только последовательное соединение обмоток треугольника и звезды, показанное на рис. 1. На нем также изображена векторная диаграмма токов для шестифазной обмотки. В отличие от параллельного соединения звезды и треугольника, последовательное соединение позволяет избежать токов, протекающих между звездой и треугольником. Очевидно, что обмотка каждой фазы работает с отличным вектором тока, так что эти обмотки называются псевдо шестифазными. На рис. 2 изображены все существующие векторы токов классической трехфазной и шестифазной схем.

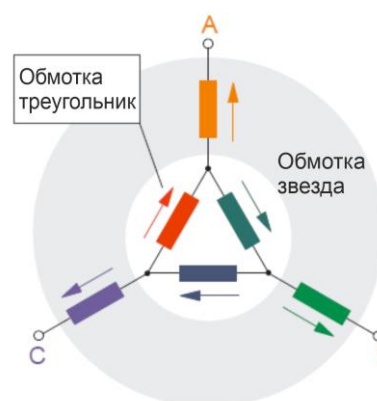


Рис. 1 Схема рассматриваемых обмоток

Ясно, что при использовании 12 векторов тока будет подавлена большая часть гармонических составляющих. Согласно теории гармоник обмоток, обычные целочисленные пазовые обмотки (m = число фаз) генерируют только гармоники ν порядка:

$$\nu = 2mM \pm 1 \quad (1)$$

где M – целое число. По этой причине трехфазные обмотки порождают гармоники 5, 7, 11, 13... порядков. Шестифазные обмотки (как и обсуждаемые в статье) порождают гармоники только 11, 13, 23... порядков. Теория обмоточных гармоник детально рассмотрена в работах [3] и [4]. Меньшая гармоническая составляющая может быть легко показана с помощью диаграммы Гёргеса, приведенной на рис. 3. Диаграмма Гёргеса построена путем соединения векторов тока в порядке их появления в пазах статора. Диаграмма совмещенных обмоток по форме приближается к кругу.

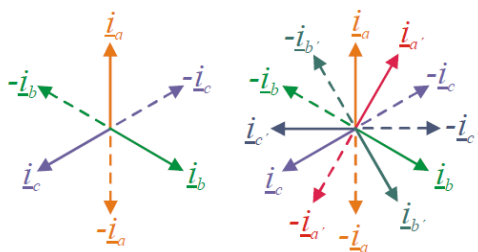


Рис. 2 Фазовая диаграмма трехфазной (слева) и шестифазной (справа) систем.

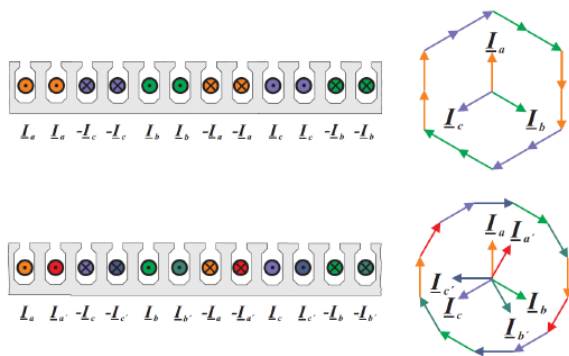


Рис. 3 Статоры с 12 пазами на пару полюсов (слева) и диаграммы Гёргеса (справа) трехфазной (сверху) и шестифазной (снизу) систем.

Как показано в [4], гармоническая составляющая тем ниже, чем ближе форма диаграммы к кругу. Двухслойные обмотки могут быть построены с укороченными катушками. Наилучшее соотношение между шагом катушек u_c и диаметральным шагом u_0 составляет $(2m-1)/2m$. При использовании совмещенных обмоток соотношение повышается с 5/6 до

11/12. Этот эффект повышает обмоточный коэффициент. Более того, половинные фазные секции совмещенных обмоток также повышают общий обмоточный коэффициент не зависимо от укорочения катушек. На рис. 4 приведены диаграммы Гёргеса обмоток с укороченными катушками.

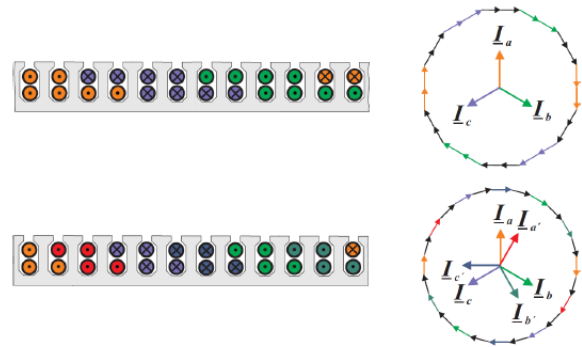


Рис. 4 Пазовые токи и Полигоны Джорджа обмоток с 5/6 укороченными катушками (сверху) и 11/12 укороченными катушками (внизу)

Если требуется увеличить эффективность машины, используя тот же магнитопровод, то существует три варианта замены стандартных обмоток на совмещённые:

- Стандартные и совмещенные однослойные обмотки;
- Стандартные и совмещенные двухслойные обмотки;
- Двухслойные стандартные обмотки, и однослойные совмещенные.

II. Изучение характеристик совмещенных обмоток

Изучение характеристик происходит путем сравнения совмещенных обмоток с обычными трехфазными на том же пакете магнитопровода.

A. Стандартные и совмещенные однослойные обмотки

Шаг обмотки в таком двигателе является полным, в результате общий коэффициент перекрытия $\xi_{c,1} = 1$. Общий обмоточный коэффициент ξ_1 зависит только от обмоточного коэффициента фазной зоны $\xi_{b,1}$. При известных значениях числа пазов на пару полюсов (N/p) и числа фаз m , обмоточный коэффициент для каждой из гармоник может быть вычислен по следующей формуле:

$$\xi_v = \frac{2m}{N/p} \frac{\sin\left(\frac{v\pi}{2m}\right)}{\sin\left(\frac{v\pi}{N/p}\right)} \sin\left(\frac{v\pi}{2}\right) \quad (2)$$

В таблице 1 отображены обмоточные коэффициенты трех- и шестифазных обмоток, соответствующих совмещенным.

Пазов на пару полюсов N/p	3-фазная обмотка $\xi_{1,3\sim}$	6-фазная обмотка $\xi_{1,6\sim}$	$\xi_{1,3\sim}/\xi_{1,6\sim}$	$(\xi_{1,3\sim}/\xi_{1,6\sim})^2$
12	0,966	1	0,966	0,933
24	0,958	0,991	0,967	0,935
36	0,956	0,99	0,966	0,932
48	0,956	0,989	0,967	0,934
60	0,955	0,989	0,966	0,932

Табл. 1 Обмоточные коэффициенты

В четвертом столбце показаны соотношения обмоточных коэффициентов для обоих типов обмотки. Это соотношение показывает, насколько должно быть снижено число витков в совмещенной обмотке. И наоборот, сечение проводников должно быть увеличено в столько же раз для достижения того же коэффициента заполнения. Оба действия приводят к тому, что сопротивление обмотки и потери в проводниках уменьшаются пропорционально квадрату обмоточного коэффициента [6], что и отображено в последнем столбце Таблицы 1. Также можно наглядно увидеть снижение потерь в проводниках совмещенных обмоток на 7% по сравнению со стандартными обмотками.

Проблему потерь в роторе асинхронных и синхронных машин следует рассмотреть отдельно. Потери в роторах синхронных машин значительно ниже, поэтому даже если снизить их путем применения совмещенных обмоток, общая эффективность машины повысится незначительно, но может быть решена проблема нагрева магнитов. Асинхронные машины, в свою очередь, имеют значительные потери в роторе. К ним относятся как потери в проводниках, вызванные общими токами в роторе, так и дополнительные потери, вызванные гармонической составляющей, которая в свою очередь является результатом гармоник статора. В [7] приведен график, согласно которому количество дополнительных потерь может достигать до 25%. Чтобы вычислить их точное количество придется приложить немало усилий.

Существуют два процесса, которые влияют на эти потери:

- Гармонические токи напрямую вызывают потери в проводниках ротора
- Гармонические токи вызывают крутящий момент и влияют на механическую характеристику машины; сократится скорость вращения машины, но скорость скольжения и потери на скольжение увеличатся

Проще всего сравнивать различные обмотки путем сравнения их гармоник рассеивания σ_0 . Утечка гармоник — это отношение энергии поля, вызванной гармониками, к энергии основного поля [5]. При известном обмоточном коэффициенте каждого порядка гармоник, гармоники утечки могут быть вычислены:

$$\sigma_o = \sum_{v \neq 1} \left(\frac{\xi_v}{v \xi_1} \right)^2 \quad (3)$$

В табл. 2 приведены гармоники рассеивания стандартной и совмещенной обмоток для разных чисел пазов на пару полюсов. Можно видеть, что в большинстве случаев совмещенные обмотки генерируют только половину гармонической составляющей. Если дополнительные потери в роторе стандартного двигателя составляют примерно 20%, то применение совмещенных обмоток снижает их на 10%.

Пазов на пару полюсов N/p	$\sigma_{o,3\sim}$ 3-фазная обмотка (%)	$\sigma_{o,6\sim}$ 6-фазная обмотка (%)	$\sigma_{o,3\sim}/\sigma_{o,6\sim}$
12	2,572	2,064	1,25
24	0,740	0,464	1,60
36	0,408	0,175	2,34
48	0,323	0,103	3,14
60	0,282	0,070	4,06

Табл. 2 Гармоники рассеивания

В. Стандартные и совмещенные двухслойные обмотки

Двухслойные обмотки обычно изготавливают с укороченными катушками. Коэффициент шага может быть легко вычислен:

$$\xi_{p,v} = \sin \left(v \frac{\pi y_c}{2 y_\phi} \right) \quad (4)$$

Общий обмоточный коэффициент трехфазных обмоток с шагом укороченных катушек 5/6 равен 0,966, а совмещенных с шагом укороченных катушек 11/12 – 0,991. Таким образом, разница между обмоточными коэффициентами совмещенных обмоток выше, чем для однослойных обмоток. Однако, если число катушек на пару полюсов и фаз нечетно, нельзя сделать обмотку с наиболее подходящим шагом катушек, поэтому потребуется изменить изначальный шаг. В

таблице 3 приведены обмоточные коэффициенты для обоих типов обмоток. Можно видеть, что омические потери в статоре снижаются на 11,5-13%.

Пазов на пару полюсов N/p	3-фазная обмотка $\xi_{1,3\sim}$	6-фазная обмотка $\xi_{1,6\sim}$	$\xi_{1,3\sim}/\xi_{1,6\sim}$	$(\xi_{1,3\sim}/\xi_{1,6\sim})^2$
12	0,933	1	0,933	0,870
24	0,925	0,983	0,941	0,885
36	0,924	0,986	0,937	0,878
48	0,923	0,981	0,941	0,885
60	0,923	0,984	0,938	0,880

Табл. 3 Обмоточные коэффициенты двухслойных обмоток

Гармоническая составляющая обоих типов обмотки приведена в табл. 4 в виде гармоник рассеивания. Очевидно, что заметная разница между этими типами обмоток наблюдается при больших числах пазов на пару полюсов. Однако, испытания машины с 24 пазами на пару полюсов доказали явное снижение потерь в роторе при использовании совмещенных обмоток. Это обстоятельство может быть объяснено при более глубоком анализе спектра гармоник и геометрии ротора. На рис. 5 показаны гармоники токов полного потока индукции. Ток потока индукции каждой из гармоник может быть вычислен через обмоточный коэффициент:

$$\frac{\Theta_v}{\Theta_1} = \frac{\xi_v}{v \xi_1} \quad (5)$$

Пазов на пару полюсов N/p	$\sigma_{o,3\sim}$ 3-фазная обмотка (%)	$\sigma_{o,6\sim}$ 6-фазная обмотка (%)	$\sigma_{o,3\sim}/\sigma_{o,6\sim}$
12	2,101	2,064	1,02
24	0,484	0,436	1,11
36	0,191	0,160	1,20
48	0,119	0,089	1,34
60	0,085	0,058	1,46

Табл. 4 Гармоники рассеивания

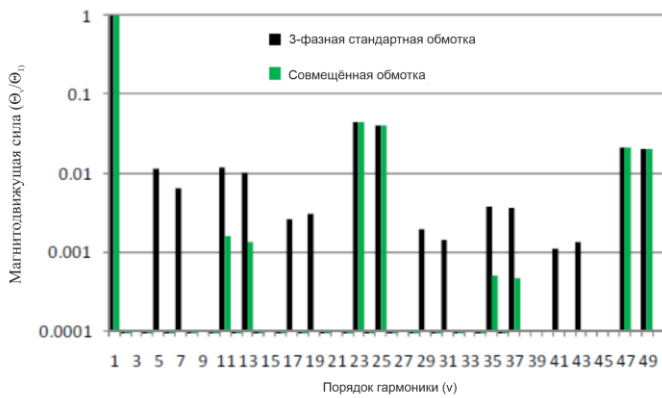


Рис.5 Спектр магнитодвижущей силы статора с 24-мя пазами на полюс

Для оценки потерь в роторе лучше отобразить квадрат магнитодвижущей силы, как в (3), потому как квадрат гармоник пропорционален потерям. Это отображено на рис. 6. Очевидно, что пазовые гармоники (кратны N/p) порождают наибольшие потери. Однако, большинство роторов разрабатываются так, чтобы подавлять влияние пазовых гармоник. Возможно два варианта:

- Стержни беличьей клетки со скосом [8]
- Число пазов ротора подобрано так, чтобы ослабить магнитную связь пазовых гармоник [9]

Ротор изучаемого двигателя имеет 40 скошенных пазов и 4 полюса. Коэффициент скоса ξ_s и обмоточный коэффициент ротора $\xi_{R,v}$ показаны на рис. 7 и 8. Заметно, что пазовые гармоники статора очень слабо связаны с обмоткой ротора. Таким образом, дополнительные потери ротора могут быть вызваны только гармониками более низкого порядка, чем порядок пазовых гармоник. Однако, благодаря использованию совмещенных обмоток, такие гармоники исключаются. Таким образом, применение совмещенных обмоток помогает избежать дополнительных потерь в роторе.



Рис. 6 Спектр квадратов МДС статора

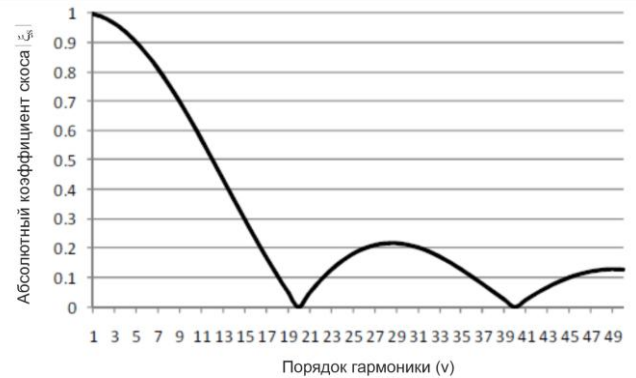


Рис. 7 Коэффициент скоса двигателя с 24 пазами на пару полюсов

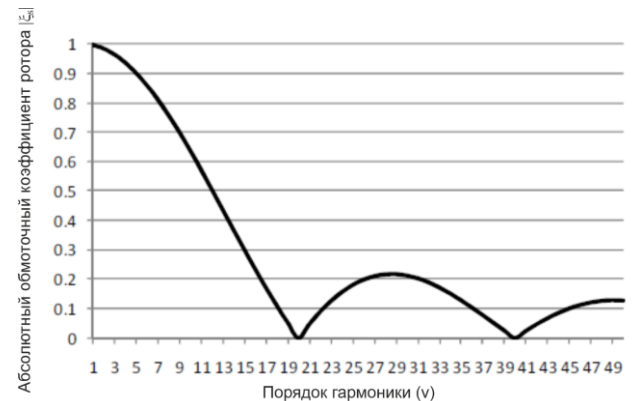


Рис. 8 Обмоточный коэффициент ротора мотора с 24 пазами на пару полюсов

С. Двуслойные стандартные обмотки, а совмещенные – однослойные

В третьем варианте замена типа обмоток не влияет на гармоническую составляющую, целью же замены является снижение трудозатрат на изготовление обмотки. Это возможно, потому что количество катушек в совмещенной обмотке вдвое меньше, чем в стандартной. Основной обмоточный коэффициент приведен в табл. 5. Как можно видеть,

потери в проводниках статора снижаются на 13% вне зависимости от количества пазов. Гармоническая составляющая в совмещенных обмотках немного меньше, чем у классических трехфазных обмоток. Также в данном случае нет значительного уменьшения потерь в роторе. На рис. 9 приведены спектры магнитодвижущей силы статора с 24 пазми на пару полюсов. Важные гармоники 11-го и 13-го порядков не исчезают при использовании совмещенных обмоток.

Пазов на пару полюсов N/p	3-фазная обмотка $\xi_{1,3\sim}$	6-фазная обмотка $\xi_{1,6\sim}$	$\xi_{1,3\sim}/\xi_{1,6\sim}$	$(\xi_{1,3\sim}/\xi_{1,6\sim})^2$
12	0,933	1	0,933	0,871
24	0,925	0,991		
36	0,924	0,990		
48	0,923	0,989		
60	0,923	0,989		

Табл. 5 Обмоточные коэффициенты

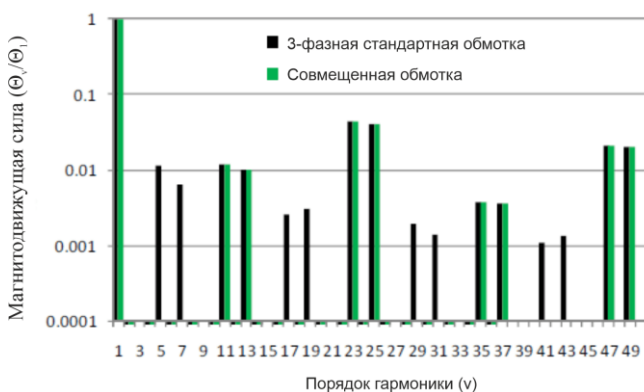


Рис. 9 Спектры МДС статора с 24 пазми на пару полюсов (двухслойная трёхфазная обмотка и однослойная совмещенная обмотка)

III. Технология совмещенных обмоток

Совмещенные обмотки состоят из двух частей – обмоток треугольника и звезды. МДС обеих частей должна быть одинакова для того, чтобы уменьшить гармоническую составляющую. Но токи в обмотке треугольника меньше в 1,73 раза. Таким образом, число витков обмотки треугольника должно быть увеличено в это же число раз, однако для сохранения геометрии паза и магнитопровода следует уменьшить в это же число раз сечение

проводника. Единственным недостатком совмещенных обмоток является то, что для них необходимо изготавливать два типа катушек. Невозможно достигнуть необходимого соотношения чисел витков обмоток треугольника и звезды если в катушках слишком малое количество витков. В таблице 6 приведены эти соотношения и относительная погрешность. Если число витков обмотки звезды меньше 3, то магнитодвижущие силы обеих обмоток взаимодействуют сложным образом, что повышает гармоническую составляющую. На рис. 10-13 приведены все обсуждаемые применения обмоток с 12 пазми на пару полюсов. Очевидно, что наиболее простыми в изготовлении являются однослойные обмотки, в то время как двухслойные обмотки содержат много сложных соединений. А меньшее количество витков проще в производстве.

Количество витков w		$w\Delta/wY$	Относительная погрешность (%)
Катушки звезды	Катушки треугольника		
1	2	2,00	15,5
2	3	1,50	-13,4
3	5	1,67	-3,77
4	7	1,75	1,04
5	9	1,80	3,92
6	10	1,67	-3,77
7	12	1,71	-1,03
8	14	1,75	1,04
9	16	1,78	2,64
10	17	1,70	-1,85
11	19	1,73	-0,28

Табл. 6 Наиболее точные соотношения витков и относительная погрешность

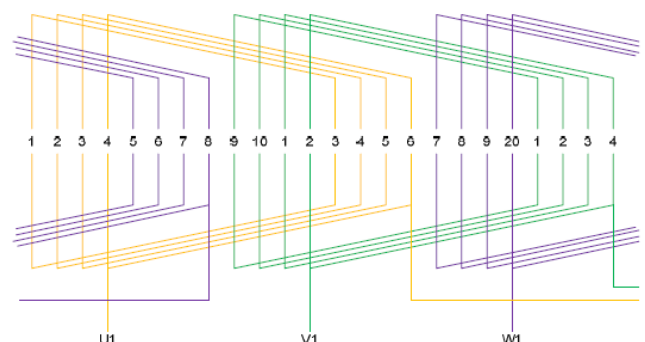


Рис. 10 Трёхфазная однослойная обмотка (часть целой обмотки)

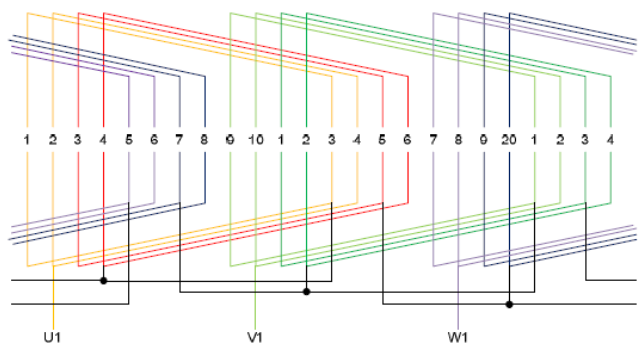


Рис. 11 Совмещенная однослойная двухполюсная обмотка

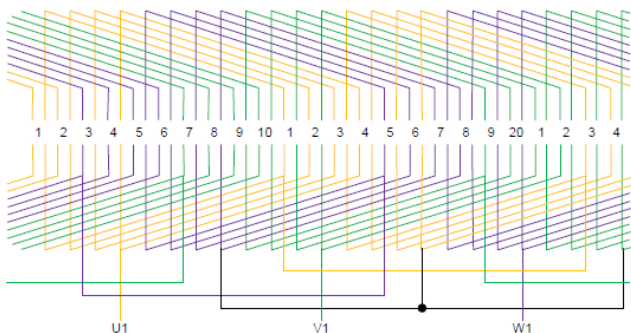


Рис. 12 Трехфазная двухслойная двухполюсная обмотка

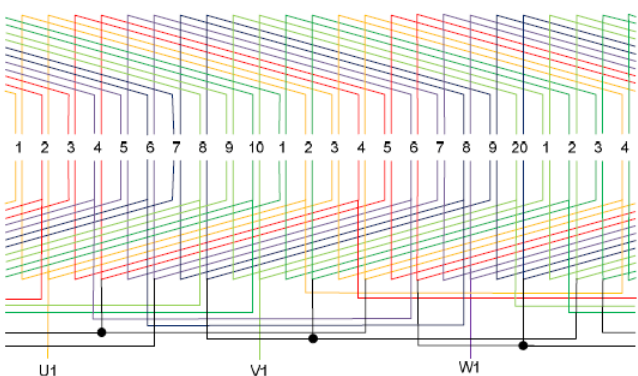


Рис. 13 Совмещенная двухполюсная двухслойная обмотка

IV. Результаты измерений

Были изготовлены две асинхронные машины с 4 полюсами и установленной мощностью 30 кВт. Один – стандартный трехфазный мотор с двухслойной обмоткой (VEM Motors) подобной обмотке, изображенной на рис. 12. Другой мотор – с совмещенной обмоткой, подобной изображенной на рис. 13. На рис. 14 показаны лобовые части обмоток. Лобовые части совмещенной обмотки незначительно больше, однако они

умещаются в тот же корпус. Как и ожидалось, сопротивление холодной совмещенной обмотки на 13,5% ниже, чем стандартной. В табл. 7 приведены потери обеих машин.

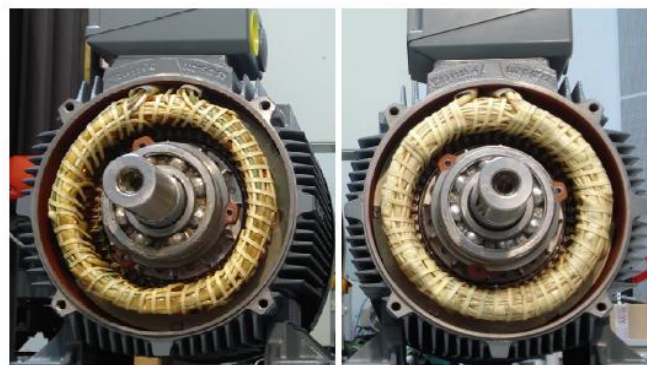


Рис. 14 Лобовые части обмоток: стандартной (слева) и совмещенной (справа)

Потери	Стандартная обмотка	Совмещенная обмотка
Потери на трение (W)	154	154
Потери в магнитопроводе (W)	792	792
Добавочные потери (W)	644	644
Потери в проводниках (W)	981	853
Потери в роторе (W)	847	749
Общие потери (W)	3418	3192
КПД (%)	89.8	90.4

Табл. 7 Результаты измерений: потери

Омические потери в проводниках совмещенной обмотки ниже на 13%, а потери в роторе ниже на 12%, чем у стандартной обмотки. Таким образом, суммарные потери снижаются на 224 Вт.

Если ротор изготовлен из меди (требуется новые дорогостоящие технологии медной заливки роторов) потери в роторе будут уменьшаться в соответствии с более высокой удельной проводимостью меди, K :

$$\kappa_{Al}/\kappa_{Cu} = 30/45 \cdot 847 \text{ W} = 565 \text{ W}. \quad (6)$$

При применении медного короткозамкнутого ротора суммарные

потери будут снижены на 280 Вт. Результат этого метода не намного превосходит результат, полученный только при замене стандартных обмоток на совмещенные. Для снижения потерь в алюминиевом роторе возможно применение более толстых замыкающих колец. Наконец, на рис. 15 изображены механические характеристики обеих машин. Очевидно, что машина с совмещенными обмотками обладает более высоким моментом, потому как тормозящие моменты, вызываемые гармониками, ниже.

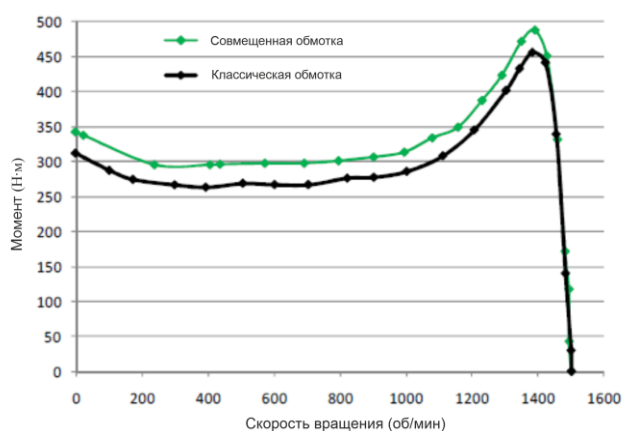


Рис. 15 Механические характеристики исследуемых машин

V. Заключение

Согласно требованиям стандарта ИЕС 60034-30, эффективность стандартных асинхронных двигателей должна быть повышена до 2011 года. Это мотивируется снижением энергопотребления и выбросов углекислоты. Совмещенные обмотки повышают эффективность электрических машин. Их преимущества:

- могут быть использованы при том же пакете магнитопровода
- не требуется использование большего количества стали и меди
- обмотки могут быть изготовлены двухслойными и однослойными

Более того, возможно заменить обычные двухслойные обмотки однослойными совмещенными без повышения гармонической составляющей в воздушном зазоре. Количество сэкономленной энергии сравнимо с оным при использовании медного короткозамкнутого ротора. Поэтому, вышеописанным образом можно избежать многих недостатков (более сложное изготовление и большая масса ротора). По этим причинам и с целью энергосбережения следует пересмотреть старую идею совмещенных псевдошестифазных обмоток.

Ссылки

- [1] W. Kothals-Altes, "Motor winding," US Patent 1,267,232, May 1918.
- [2] H. Auinger, "Combined star-polygon plural phase winding for an electric machine", European Patent 0,557,809, September 1993.
- [3] M.V. Cistelecan, F.J.T.E. Ferreira, and M. Popescu, "Adjustable Flux Three-Phase AC Machines With Combined Multiple-Step Star-Delta Winding Connections", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 25, No.2, pp. 348-355, June 2010.
- [4] Clayton and E. Albert, "A mathematical development of the theory of the magnetomotive force of windings," Electrical Engineers, July 1923.
- [5] V. Klima and B. Heller, "Das Görgessche Durchflutungspolygon II," Electrical Engineering, Volume 52, Number 2, pp. 114-125.
- [6] H. Jordan, V. Klima, and K. P. Kovács, "Asynchronmaschinen", Vieweg & Sohn Braunschweig, Budapest, 1975.
- [7] R. Richter, "Elektrische Maschinen" Band 4, Birkhäuser Basel/Stuttgart 1954.
- [8] P. F. Ryff, "Electric Machinery", Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, 1994.
- [9] E. S. Hamdi, "Design of Small Electrical Machines", John Wiley & Sons Ltd., Baffins Lane, 1994.