Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»
==========

УДК 621.313.3

Перспективы применения совмещённой обмотки для снижения электрических потерь в статоре

Мартынов К.В., Носков В.А., Пантелеева Л.А., Васильев Д.А.

Ижевская государственная сельскохозяйственная академия

Аннотация

При ремонте двигателя с заменой обмотки статора его энергетические характеристики во многом будут определяться расчётом и выбором конструкции обмотки. Совмещённая 12-зонная обмотка статора обладает меньшим относительным содержанием высших пространственных гармоник в кривой магнитодвижущей силы, чем аналогичная ей стандартная 6-зонная обмотка. Применение совмещённой обмотки может привести также к уменьшению электрических потерь в статоре. В статье описывается разработанная методика оценки изменения электрических потерь в статоре при переходе от стандартной обмотки к совмещённой. Приведены результаты расчёта для двигателей из серии АИР с однослойными обмотками. Установлено, что наибольшего потенциального снижения электрических потерь в статоре стоит ожидать, если при переходе от стандартной к совмещённой обмотке не происходит изменения шага катушки. Для обмоток «в развалку» переход к совмещённой обмотке не всегда может сопровождаться уменьшением электрических потерь в статоре, однако с ростом длины сердечника статора по отношению к длине его полюсного деления применение совмещённой обмотки становится более выгодным.

Ключевые слова: АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ, СОВМЕЩЁННАЯ ОБМОТКА, ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ, ОБМОТКА СТАТОРА

Введение

В сельскохозяйственном производстве асинхронные двигатели находятся в тяжёлых условиях эксплуатации, что повышает вероятность их отказа. При этом наиболее часто в асинхронных двигателях повреждается обмотка статора, которую в случае ремонта приходится полностью заменять. От того, как проведён расчёт и выбор

конструкции обмотки статора, будут зависеть энергетические характеристики двигателя.

Одним из направлений улучшения характеристик двигателя является замена стандартной трёхфазной обмотки статора на совмещённую, состоящую из двух трёхфазных обмоток, соединённых по схеме: одна – звездой, другая – треугольником (рис. 1).

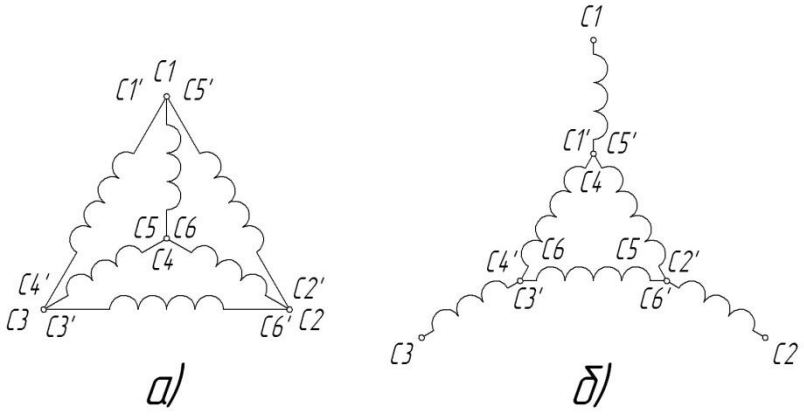

Рис. 1. Совмещённая обмотка статора, содержащая две трёхфазные обмотки, соединённые: а) параллельно; б) последовательно

Первый патент на совмещённую обмотку появился в 1918 году [1], кроме того, имеются патенты, полученные в более позднее время [2, 3].

Принципиальное отличие совмещённой обмотки заключается в том, что обмотка, соединённая по схеме звезда, смещена на статоре на 30 электрических градусов относительно обмотки, соединённой треугольником. И токи в этих обмотках также смещены по фазе на 30 электрических градусов. В результате такая совмещённая обмотка становится 12-зонной, тогда как стандартная обмотка – 6-зонная. Применение совмещённой обмотки вместо стандартной приводит к снижению высших пространственных гармоник в кривой магнитодвижущей силы [4, 5, 6, 7] и, как следствие, уменьшению магнитных потоков высших гармоник и связанных с ними негативных влияний (добавочных потерь активной мощности, «паразитных» электромагнитных моментов и др.) на работу двигателя [8].

Это положительное свойство является существенным, но не всегда достаточным для замены стандартной обмотки на совмещённую, так как последняя является конструктивно более сложной. Однако совмещённая обмотка имеет и другое потенциальное преимущество: из-за увеличения обмоточного коэффициента $k_{об}$ фазы

Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»

совмещённой обмотки будут содержать меньше витков, чем фазы стандартной, что может привести к снижению активного сопротивления обмотки статора. Методика перерасчёта со стандартной на совмещённую обмотку представлена в нашей ранее написанной статье [9].

Изменение активного сопротивления обмотки статора скажется на изменении электрических потерь $p_{эл1}$:

$$p_{эл1} = 3I_1^2 r, \quad (1)$$

где: I_1 – сила фазного тока, протекающего по обмотке статора, А; r – активное сопротивление фазы статора, Ом.

Их величина в обмотке статора зависит от нагрузки двигателя и при номинальных условиях может вносить наибольший вклад в сумму всех потерь. Например, для двигателя АИР71В4 доля $p_{эл1}$ составляет примерно 55% [10].

Цель: провести исследование и рассмотреть возможность потенциального уменьшения электрических потерь в статоре асинхронной машины при переходе от стандартной обмотки к совмещённой (с сохранением номинальных исходных данных двигателя).

Материалы исследования

В сельском хозяйстве, преимущественно, применяются асинхронные двигатели сравнительно небольшой мощности (до 10-13 кВт) [11]. Для исследования взяты справочные данные [12] двигателей серии АИР основного исполнения мощностью от 0,55 до 11 кВт. Практически во всех двигателях данного ряда обмотка статора выполнена однослойной с целым числом пазов, приходящихся на полюс и фазу q. Исключением являются АИР160S6, который имеет двухслойную обмотку, и двигатель АИР80В8, обмотка которого выполнена с дробным числом q. В нашем исследовании они не рассматривались. Стоить также отметить, что в зависимости от производителя обмоточные данные двигателей могут отличаться.

В рассматриваемых двигателях катушки обмотки статора, в основном, имеют концентрическое исполнение, при этом лобовые части каждой из катушечных групп фазы могут быть отогнуты либо в одну сторону, либо в разные – «в развалку», что может сказаться на длине обмотки. Пример лобовых частей таких обмоток для q=2 и q=3

приведён на рис. 2.

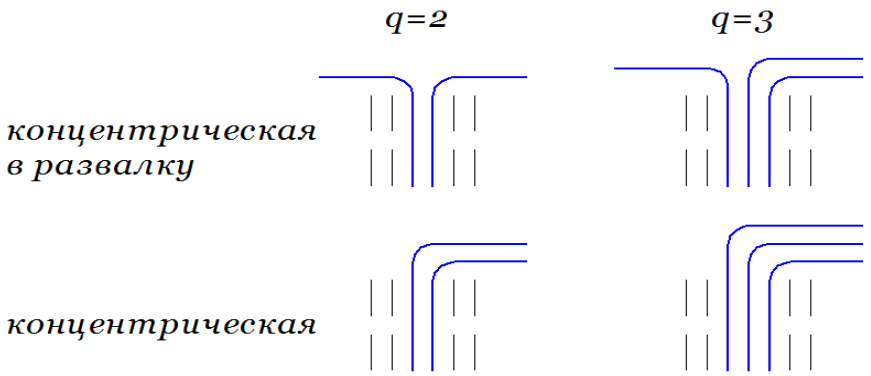

Рис. 2. Направления отгибов лобовых частей обмоток при q=2 и q=3

Для сравнения со стандартной обмоткой предлагается совмещённая однослойная обмотка с параллельным соединением фаз звезды и треугольника. Если стандартная обмотка с чётным q выполнена «в развалку», то при сравнении рассматривалась совмещённая обмотка, выполненная также «в развалку».

Стандартные обмотки с q=3 сравнивались с одно-двухслойной совмещённой обмоткой. Пример чередования фазных зон по пазам для машины с 4 полюсами с такой обмоткой приведён на рис. 3, где штрихами обозначены фазные зоны треугольника, а без штрихов – фазные зоны звезды.

Рис. 3. Чередование фазных зон по пазам одно-двухслойной совмещённой обмотки

Методика сравнительного исследования

Совмещённые обмотки наиболее применимы в двигателях, у которых расчетное число витков в фазе w достаточно большое, чтобы возможно было обеспечить соотношение витков в фазах треугольника w_Δ к фазам звезды w_Y (в случае, если обмотки треугольника и звезды одинаково распределены по пазам):

$$w_\Delta = \sqrt{3} w_Y. \quad (2)$$

Кроме того, при выполнении совмещённой обмотки рекомендуется, чтобы соотношения сечений обмотки соответствовали равенству:

$$S_{\Delta} = \frac{1}{\sqrt{3}} S_Y. \quad (3)$$

При этом сопротивления фаз звезды и треугольника будут различны, поэтому для удобства анализа перейдём от совмещённой обмотки к эквивалентной ей обмотке, соединённой по схеме звезда. Пользуясь известными формулами из электротехники, преобразуем треугольник в эквивалентную звезду. Приняв условие, что сопротивления фаз звезды ($z_{AY}=z_{BY}=z_{CY}=z_Y$) и сопротивления фаз треугольника ($z_{A\Delta}=z_{B\Delta}=z_{C\Delta}=z_{\Delta}$) равны между собой, получим промежуточную схему с параллельными ветвями (рис. 4б).

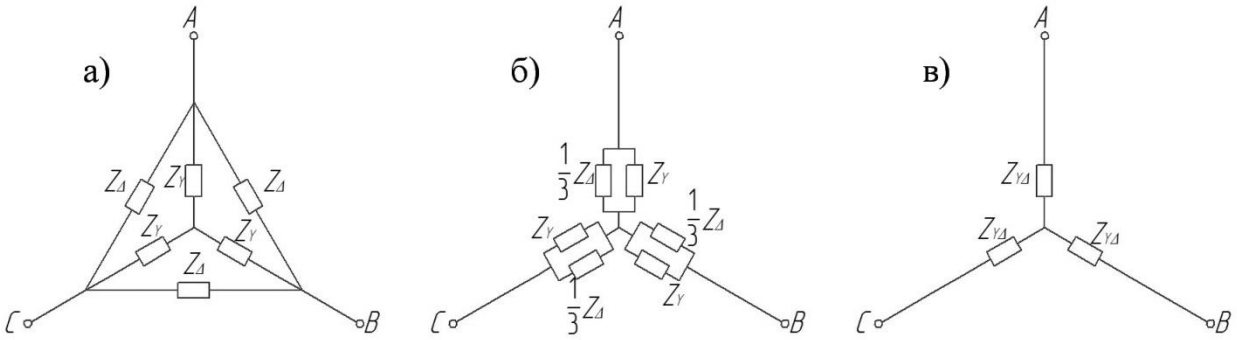

Рис. 4. Преобразование схемы соединения совмещённой обмотки:
а) исходная схема; б) промежуточная схема; в) преобразованная эквивалентная схема.

Если при изготовлении совмещённой обмотки соблюдать равенства (2) и (3), то активные сопротивления фаз треугольника будут в три раза больше активных сопротивлений фаз звезды. Известно, что при прочих равных условиях индуктивные сопротивления в асинхронном двигателе [8, 10] пропорциональны квадрату числа витков w^2, а значит при соблюдении равенства (2) индуктивные сопротивления треугольника будут также в три раза больше сопротивлений звезды. Следовательно, выполняя условия (2) и (3), получим следующее соотношение между сопротивлениями:

$$z_Y = \frac{1}{3} z_{\Delta}. \quad (4)$$

Преобразовав схему (рис. 4б), перейдём от реальных сопротивлений совмещённой обмотки к эквивалентному, активная составляющая которого будет определять электрические потери в этой обмотке (рис. 4в):

$$z_{Y\Delta} = \frac{z_Y \cdot \frac{1}{3} z_\Delta}{z_Y + \frac{1}{3} z_\Delta} = \frac{z_Y}{2}. \quad (5)$$

$$r_{Y\Delta} = \frac{r_Y}{2} = \frac{r_\Delta}{6}. \quad (6)$$

Стоит отметить, что реальное сопротивление фаз совмещённой обмотки при параллельном соединении звезды и треугольника (рис. 1б) может быть больше сопротивления фазы стандартной обмотки, соединённой по схеме звезда. Однако фазные токи при этом в такой совмещённой обмотке будут меньше. По этой причине удобно рассматривать изменение электрических потерь в статоре с помощью эквивалентной схемы.

Определим изменение эквивалентного активного сопротивления обмотки Δr в % при применении совмещённой обмотки вместо стандартной

$$\Delta r = \frac{r_0 - r_{Y\Delta}}{r_0} 100\%, \quad (7)$$

где r_0 – активное сопротивление стандартной обмотки.

При Δr>0 – совмещённая обмотка является более предпочтительной по отношению к стандартной ($r_0 > r_{Y\Delta}$);

Δr=0 – совмещённая и стандартная обмотки имеют равные активные сопротивления;

Δr<0 – совмещённая обмотка имеет активное сопротивление больше, чем стандартная.

Активное сопротивление обмотки зависит от материала, из которого выполнен провод, то есть его удельного сопротивления ρ, а также количества витков в фазе w_1, средней длины витка $l_{ср}$ и площади поперечного сечения провода S:

$$r = \rho \frac{l_{ср} w_1}{S} = \rho \frac{l_{ср} w}{S k_{об}}, \quad (8)$$

где: w – эффективное число витков; $k_{об}$ – обмоточный коэффициент.

$l_{ср}$ представляет собой удвоенную сумму длины проводника в пазу $l_п$ и в лобовой части $l_л$:

$$l_{ср} = 2(l_п + l_л). \quad (9)$$

Если пазы выполнены без скоса, то длина обмотки в пазу будет равна длине сердечника статора l_1. Длина лобовой части зависит от нескольких факторов, в том числе и от конструкции обмотки, в приближённом виде она определяется по следующей эмпирической формуле [13]:

$$l_Л = K_л b_{кт} + 2B, \quad (10)$$

где: $K_л$ – коэффициент, зависящий от числа полюсов 2р и наличия изоляции лобовых частей (табл. 1 [13]); В – длина влета прямолинейной части катушек от торца сердечника до начала отгиба лобовой части; $b_{кт}$ – средняя ширина катушки:

$$b_{кт} = \frac{\pi(D + h_п)}{2p}\beta_{кт}, \quad (11)$$

D – внутренний диаметр статора; $h_п$ – высота паза; $\beta_{кт}$ – укорочение шага катушки.

Таблица 1. Значение эмпирических параметров, определяющих длину лобовой части обмотки

Число полюсов 2р	Коэффициент $K_л$		Длина влёта катушки В, м	
	Лобовые части не изолированы	Лобовые части изолированы лентой	Обмотка укладывается до запрессовки сердечника в корпус	Обмотка укладывается после запрессовки сердечника в корпус
2	1,2	1,45	0,010	0,015
4	1,3	1,55		
6	1,4	1,75		
≥8	1,5	1,9		

Геометрические размеры катушки изображены на рис. 5.

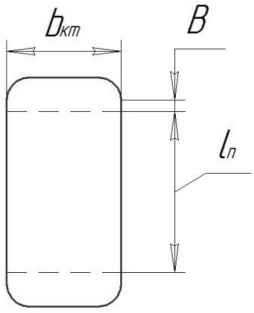

Рис. 5. Геометрические размеры катушки

Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»
==========

Так как в концентрических обмотках катушки катушечной группы имеют разную длину, то удобно оценивать, предварительно преобразовав их к одной средней длине. Кроме того, если обмотка выполнена «в развалку», шаг катушки может отличаться от диаметрального и иметь некоторое относительное укорочение $\beta_{кт.}$, хотя расположение магнитных осей при этом будет оставаться таким же, как и при катушках с диаметральным шагом.

Если при перерасчёте сечения обмотки статора со стандартной на совмещённую придерживаться сохранности коэффициента заполнения паза статора, то соотношение между сечениями стандартной S_0 и эквивалентной приведённой совмещённой обмотки $S_{Y\Delta}$ будет:

$$\frac{S_0}{S_{Y\Delta}} = \frac{k_{обY\Delta}}{k_{об0}}. \quad (12)$$

Введём величину $S_{эф}$, характеризующую сечение провода при условии, если w_1=w, а коэффициент заполнения паза оставался бы прежним.

$$S_{эф} = \frac{S}{k_{об}}. \quad (13)$$

Из вышесказанного получим приближённую формулу для определения активного сопротивления обмотки статора:

$$r = \frac{2\rho w}{S_{эф}} \cdot \frac{l_1 + K_л \tau' \beta + 2B}{k_{об}^2}, \quad (14)$$

где τ' – длина полюсного деления на уровне середины пазов статора:

$$\tau' = \frac{\pi(D + h_n)}{2p}. \quad (15)$$

В выражении (14) $2\rho w/S_{эф}$, первая составляющая активного сопротивления, не зависит от вида обмотки, поэтому при сравнении различных обмоток рассмотрим вторую составляющую $(l_1+K_л\tau'\beta+2B)/k^2_{об}$.

Из формул (14) и (15) можно заметить, что влияние длины лобовой части на сопротивление провода тем больше, чем больше диаметр статора D по отношению к его длине l_1. По этой причине удобно сравнивать обмотки при различных значениях коэффициента λ, характеризующего отношение главных размеров машины:

Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»
==========

$$\lambda = \frac{l_1}{\tau}, \tag{16}$$

где длина полюсного деления τ определяется по формуле:

$$\tau = \frac{\pi D}{2p}. \tag{17}$$

Если пренебречь длиной вылета катушки B и размерами паза $h_п$, то получим приблизительную зависимость сопротивления от λ:

$$r \propto \tau \frac{\lambda + K_л \beta_{кт}}{k_{об}^2}. \tag{18}$$

Полный расчёт с учётом B и $h_п$ стоит проводить по нижеследующей зависимости:

$$r \propto \tau' \frac{\lambda' + K_л \beta_{кт}}{k_{об}^2}, \tag{19}$$

где $\lambda' = \frac{l_1 + 2B}{\tau'}$.

Результаты

Для анализа разобьём рассматриваемые двигатели с однослойной обмоткой на две группы. **К первой группе** относятся 27 двигателей с обмоткой «в развалку», для которых при переходе от стандартной обмотки к совмещённой изменялась длина катушки. При этом сопротивление обмотки будет зависеть от значения коэффициента λ. В двигателях из данной группы выделим шесть подгрупп, в которых стандартные обмотки имеют равное число полюсов 2p и число пазов, приходящихся на полюс и фазу q:

1) 2p=6, q=2; 2) 2p=8, q=2; 3) 2p=4, q=3; 4) 2p=6, q=3; 5) 2p=2, q=4; 6) 2p=2, q=6.

Так как при ремонте обмотка двигателей укладывается в пазы уже запрессованного сердечника статора, то, согласно [13], значение величины B возьмём равным 0,015 м. Значение же коэффициента $K_л$ может быть различным, поэтому рассмотрим два крайних случая, представленных в таблице 1.

На рис. 6 представлена разница активных сопротивлений стандартной и совмещённой обмотки в зависимости от значений λ.

Линиями на графике изображены зависимости, полученные с помощью оценки сопротивлений по упрощенной формуле (18), маркерами рядом с зависимостями даются

значения Δr при сравнении с помощью полного расчёта (19).

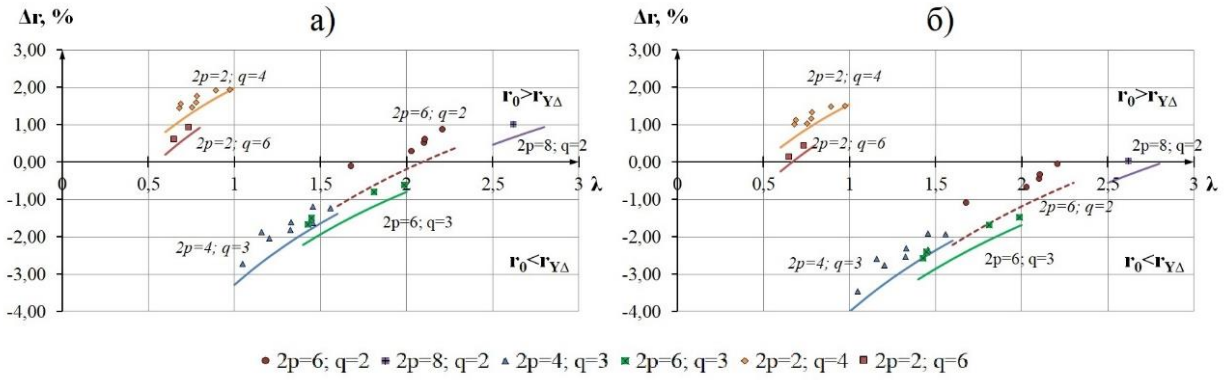

Рис. 6. Сравнение активных сопротивлений обмоток в зависимости от λ: а) при минимальной изоляции лобовых частей; б) с изолированными лобовыми частями

В таблице 2 приведены двигатели из первой группы с обмоткой «в развалку», для которых применение совмещённой обмотки теоретически приведёт к снижению электрических потерь в обмотке статора.

Таблица 2. Асинхронные двигатели серии АИР с обмоткой «в развалку»

Тип	**Мощность P1, кВт**	**Число полюсов 2p**	**q**	**Δr, %**	
				Лобовые части не изолированы	Лобовые части изолированы лентой
АИР71В6	0,55	6	2	0,87	-0,06
АИР71А2	0,75	2	4	1,57	1,13
АИР71В2	1,1	2	4	1,77	1,33
АИР80В6	1,1	6	2	0,61	-0,34
АИР80А2	1,5	2	4	1,45	1,02
АИР90L6	1,5	6	2	0,50	-0,46
АИР100L8	1,5	8	2	1,01	0,03
АИР80В2	2,2	2	4	1,92	1,48
АИР100L6	2,2	6	2	0,28	-0,69
АИР90L2	3	2	4	1,61	1,17
АИР100S2	4	2	4	1,46	1,03
АИР100L2	5,5	2	4	1,94	1,50
АИР112М2	7,5	2	6	0,91	0,43
АИР132М2	11	2	6	0,60	0,13

Во вторую группу были включены двигатели с обмотками, у которых стороны лобовых частей направлены в одну сторону, и укорочение шага катушки не происходит:

$\beta_{кт}$=1. Применение в таких двигателях совмещённой обмотки может привести к снижению эквивалентного активного сопротивления, независимо от λ, за счёт меньшего числа витков и лучшего заполнения паза медью:

$$\Delta r = \left(1 - \frac{k_{об0}^2}{k_{обY\Delta}^2}\right) \cdot 100\%. \quad (20)$$

Такие двигатели из рассматриваемого ряда представлены в таблице 3.

Таблица 3. Асинхронные двигатели серии АИР с однослойными концентрическими обмотками

Тип	Мощность P1, кВт	Число полюсов 2p	q	Δr, %
АИР 160 M8	11	8	2	6,7
АИР 90 LB8	1,1	8		
АИР 160 S8	7,5	8		
АИР 112 MB8	3	8		
АИР 90 LA8	0,75	8		
АИР 112 MA8	2,2	8		
АИР 132 M8	5,5	8		
АИР 132 S8	4	8		
АИР 71 A4	0,55	4	3	5,3
АИР 71 B4	0,75	4		

Стоит отметить, что таблицы 2 и 3 были составлены по справочным данным [12], которые на практике, в зависимости от производителя, могут отличаться. Кроме того, при ремонте может быть выбрана иная конструкция обмотки.

Выводы

1. Применение однослойных совмещённых обмоток с целью уменьшения электрических потерь в обмотке статора наиболее выгодно, если при замене не увеличивается относительный шаг катушки $\beta_{кт}$. Такое возможно, например, когда лобовые части всех катушек катушечной группы стандартной обмотки отогнуты в одну сторону. В этом случае уменьшение эквивалентного сопротивления при замене на совмещённую обмотку не зависит от размера машины и равно 6,7% для двигателей с чётным q и 5,3% для двигателей с q=3.

2. В случае, если стандартная обмотка (выполнена «в развалку») имеет меньшее значение $\beta_{кт}$, чем совмещённая, изменение эквивалентного активного сопротивления зависит от отношения главных размеров машины. При этом с ростом длины сердечника статора по отношению к длине его полюсного деления применение совмещённой обмотки становится более выгодным.

Список использованных источников

1. Korthals-Altes W. Motor winding // U.S. Patent 1267232, 21.05.1918.

2. Auinger H. Dreiphasige Wicklung in Stern-Dreieck-Mischschaltung für eine elektrische Maschine // Patent DE 3202958, 05.06.1986.

3. Auinger H. Mehrphasige Wicklungen in Stern-Polygon-Mischschaltung für eine elektrische Maschine // Patent EP 0557809. 22.01.1997.

4. Попов В.И. Новые схемы трёхфазных обмоток электрических машин с улучшенными электромагнитными свойствами: монография. – Н. Новгород: ВГИПИ. – 1998. – 116 с.

5. Носков В.А., Пантелеева Л.А., Мартынов К.В. Повышение эффективности обмоток машин переменного тока // Электротехника. – 2018, №1. – С. 39-43.

6. Мартынов К.В., Носков В.А. Гармонический анализ магнитодвижущей силы асинхронного двигателя с совмещённой обмоткой // Развитие энергосистем АПК: перспективные технологии: материалы Международной научно-практической конференции Института агроинженерии. Под редакцией М. Ф. Юдина. – Челябинск: ФГБОУ ВО Южно-Уральский ГАУ. – 2018. – С. 94-101.

7. Мартынов К.В., Носков В.А. Гармонический анализ магнитодвижущей силы асинхронного двигателя с совмещённой обмоткой // Инновационные технологии для реализации программы научно-технического развития сельского хозяйства: материалы Международной научно-практической конференции. – Ижевск: ФГБОУ ВО Ижевская ГСХА. – 2018. – С. 151-156.

8. Вольдек А.И. Электрические машины. – Л.: Энергия. – 1978. – 832 с.

9. Мартынов К.В., Носков В.А. Методика перерасчёта асинхронного двигателя на совмещённую обмотку статора // Инновации в сельском хозяйстве. – 2018, № 3 (28). – С. 71-77.

10. Ванурин В.Н. Статорные обмотки асинхронных электрических машин: Учебное пособие. – Спб.: Лань. – 2014. – 176 с.

11. Сафонов А.С. Применение энергоэффективных электродвигателей в сельском хозяйстве // Актуальные вопросы науки и техники / Сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции. № 2. – Самара. – 2015. – С. 157-159.

12. Петриков Л.А., Корначенко Г.Н. Асинхронные электродвигатели: Обмоточные данные. Ремонт. Модернизация / Справочник. – М.: Энергоатомиздат. – 2000. – 496 с.

13. Проектирование электрических машин: учеб. для вузов / под ред. И.П. Копылова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Юрайт. – 2011. – 767 с.

==========

Цитирование:

Мартынов К.В., Носков В.А., Пантелеева Л.А., Васильев Д.А. Перспективы применения совмещённой обмотки для снижения электрических потерь в статоре // АгроЭкоИнфо. – 2020, №1. – http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2020/1/st_107.pdf.