

УДК 621.31.03

UDC 621.31.03

05.00.00 Технические науки

Technical sciences

МОДУЛИРОВАННЫЕ СТАТОРНЫЕ ОБМОТКИ ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ ПРИВОДА ВЕНТИЛЯТОРОВ

MODULATED STATOR WINDINGS OF THE MOTOR FOR FAN DRIVES

Богатырев Николай Иванович
к.т.н., профессор, SPIN-код: 4601-9136

Bogatyrev Nikolai Ivanovich
Cand. Tech. Sci., professor

Креймер Алексей Семёнович
к.т.н., доцент, SPIN-код: 4277-3264
Кубанский государственный аграрный университет, г. Краснодар, Россия

Kreymer Aleksey Semyonovich
Cand. Tech. Sci., docent
Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia

Ванурин Владимир Николаевич
докт. техн. наук, профессор, SPIN-код: 8052-4631

Vanurin Vladimir Nikolaevich
Dr.Sci.Tech., professor

Джанибеков Казбек Азрет-Алиевич
к.т.н., доцент

Dganibekov Kasbek Asret-Alievich
Cand. Tech. Sci., docent

Пономаренко Кирилл Борисович
инженер
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Северо-Кавказский научно-исследовательский институт механизации и электрификации сельского хозяйства», Зерноград, Россия

Ponomarenko Kirill Borisovich
engineer
Federal state scientific institution North-Caucasian scientific-research institute of mechanization and electrification of agriculture, Zernograd, Russia

Для создания микроклимата в птицеводстве, животноводстве, в тепличных хозяйствах, в овощехранилищах применяется значительное количество вентиляторов с асинхронными двигателями. С целью повышения эффективности скорость вентиляторов необходимо регулировать, поэтому для их привода применяются многоскоростные двигатели. Серийные двухскоростные двигатели с соотношением чисел полюсов 1:2 имеют одну полюсно-переключаемую по схеме Даландера обмотку статора. Двухскоростные двигатели с соотношением чисел полюсов 3:2 и 4:3 имеют одну полюсно-переключаемую по методу амплитудно-фазовой модуляции обмотку статора. Недостаток известных обмоток в том, что на разных скоростях вращения они имеют разные энергетические показатели. Для создания рациональных схем с переключением на кратное трем число полюсов предлагается осуществить полифазную модуляцию МДС трехфазной обмотки. В результате исследования получены статорные обмотки на 4 и 6 полюсов, которые позволяют переключением по схеме Δ/YY изменять частоту вращения двигателей в приводе вентиляторов без разрыва цепи питания

In poultry industry, animal breeding, greenhouses and vegetable stores a significant amount of fans with asynchronous motors is used to create a microclimate. The fan speed of the fan should be regulated in order to improve the efficiency, so the multispeed motors are used for the fan drives. Line produced two-speed motors with a proportion of the poles number 1:2 have a polar-switched Dahlander stator winding. Two-speed motors with a proportion of the poles number 3:2 and 4:3 have only one stator winding which is pole-switched by the method of amplitude phase shift keying. A drawback of the windings is that they have different energy indicators at different spin rates. In order to create rational diagrams with switching according to the number of poles, which is multiple of three, it is proposed to implement a polyphase MMF modulation of the three-phase winding. As a result of the study, there were procured the stator windings at 4 and 6 poles, which enabled to change the spin speed of the motor in the fan drives without breaking the drive power circuit by the scheme Δ / YY

Ключевые слова: АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ, МОДУЛИРОВАННАЯ СТАТОРНАЯ ОБМОТКА, СХЕМА ОБМОТКИ, МОМЕНТЫ ДВИГАТЕЛЕЙ

Keywords: ASYNCHRONOUS MOTOR, MODULATED STATOR WINDING, WINDING SCHEME, TORQUES

Асинхронные машины в силу ряда достоинств (относительная дешевизна, высокие энергетические показатели, простота обслуживания) являются наиболее распространенными среди всех электрических машин. Асинхронные машины выпускаются, как правило, большими сериями, наиболее значительными из которых являются машины общего назначения – серии 4А, АИ, 5А, 6А мощностью до 400 кВт [5, 7, 11].

В соответствии с ГОСТ 51689-2000 асинхронные двигатели (АД) основного (базового) исполнения могут иметь сервис-фактор, равный 1,1 или 1,15, т.е. допускать длительную перегрузку на 10 и 15% соответственно при номинальных напряжениях и частоте. При этом, превышение температуры обмоток двигателей будет не более допустимого на 10%.

Обмотка статора АД является наиболее сложной, ответственной и технологически трудоемкой в изготовлении частью электрической машины. Обмотка статора определяет своими электромагнитными свойствами, технологичностью и стоимостью все основные показатели АД. В этой связи выбор наиболее рациональных схем обмоток АД и оптимизация их электромагнитных параметров – важнейший этап современных энергосберегающих технологий [3, 4, 6, 8-10].

Анализ литературных источников показал, что современные приемы формирования обмоток статора позволяют методами усовершенствования их схем расширить поиск рационального использования габарита АД, в том числе и асинхронных генераторов [1, 2, 12-22].

Основной показатель энергоэффективности асинхронного двигателя в процессе эксплуатации - коэффициент мощности $\cos\varphi$ зависят от степени загрузки двигателя. Чем она меньше, тем больше относительная величина реактивной мощности и тем менее эффективно работает двигатель и питающие двигатель установки.

В низковольтных сетях повышение $\cos\varphi$ до определенного уровня известными способами экономически не всегда оправдано, поэтому, зача-

стую, не применяется. В этой связи поиск эффективных методов снижения потребляемой реактивной мощности в индивидуальных приводах с асинхронными двигателями остается актуальной задачей. В большей мере она затрагивает многоскоростные двигатели в приводе вентиляторов. При переключении полюсов, когда мощность на валу двигателя в приводе вентилятора изменяется практически пропорционально кубу изменения пар полюсов, важно согласовать соотношение составляющих намагничивающего и активного тока I_{μ}/I_{1a} .

Из-за отсутствия рациональных схем полюсопереключаемых статорных обмоток двигателя на 6/4 и 8/6 для привода вентиляторов выпускают с двумя обмотками (таблица 1) [10], что, очевидно снижает степень использования базового габарита и энергетическую эффективность привода.

Таблица 1 - Технические данные двухобмоточных двигателей для привода вентиляторов

Типоразмер двигателя	$P_{2н}$, кВт	$n_{2н}$, об/мин	$I_{1н}$, А	η_n , %	$\cos\varphi_n$
A71A6/4	0,12/0,4	950/1435	0,58/1,35	43/58	0,73/0,78
A71B6/4	0,18/0,55	950/1440	0,76/1,69	50/64	0,72/0,77
A80A6/4	0,28/0,9	950/1415	1,16/2,1	51/71	0,72/0,83
A80B6/4	0,37/1,2	930/1420	1,41/3,16	53/73	0,75/0,79
A100S6/4	0,55/1,7	930/1415	1,96/4,36	56/74	0,76/0,80
A100L6/4	0,9/3,0	960/1440	3,0/7,1	68/81	0,67/0,80
A132M6/4	2,0/6,0	975/1460	6,1/2,9	75/87	0,66/0,81
AIP160S6/4	4,0/12,0	980/1470	9,0/25,5	79/87	0,85/0,82
A200M6/4	7,0/23,0	988/1470	15,5/46	82,2/87,7	0,84/0,87
A200L6/4	8,0/27,0	988/1472	17/53	83,4/88,4	0,86/0,87
A225MA6/4	11,0/35,0	989/1475	22,5/64	85,5/90	0,87/0,92
A225MB6/4	12,5/40,0	990/1480	26/78,0	86/90,6	0,86/0,86
A250S6/4	18,0/49,0	977/1472	36/90	87,3/92,7	0,86/0,89
A200M8/6	7,6/18	734/982	17,5/39	82/88	0,81/0,79
A200LA8/6	8,5/20	734/974	19/40	82/88	0,81/0,86
A200LB8/6	9,5/22	734/976	21,5/45	84/89	0,80/0,83
A225M8/6	12/28	737/982	26,5/55	86/91	0,80/0,85
A250LB8/6	17/42	740/985	37/78	87/91	0,80/0,89

Формированию схем статорных обмоток с переключением на смежное кратное трем число полюсов способствует преобразованный вариант чередование фазных зон [11], позволяющий осуществить полифазную модуляцию МДС трехфазной обмотки. Для основной гармоники p полифазную модуляцию МДС по периметру статора (по координате x) условной синусоидальной волной с единичной амплитудой можно представить в виде (рисунок 1, стороны катушек фазы U обозначены квадратами, фазы V треугольниками, фазы W кругами):

$$F = F_m \cos px \cdot \sin x = \frac{F_m}{2} \sin(p-1)x + \frac{F_m}{2} \sin(p+1)x.$$

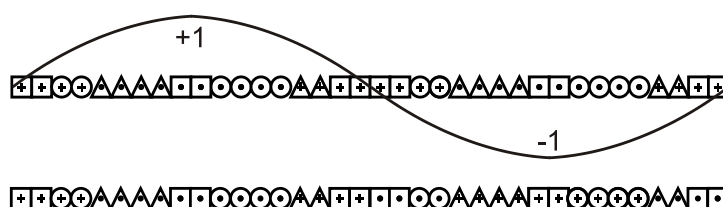


Рис. 1 - Чередование фазных зон, направление токов в сторонах катушек и представление модулирующей волны

Результат модуляции

$$F = F_m \cos px \cdot \sin x = \frac{F_m}{2} \sin(p-1)x + \frac{F_m}{2} \sin(p+1)x.$$

При исходном $p = 3$ результат модуляции сопровождается высшая гармоника $\nu = p + 1 = 3 + 1 = 4$. Если исходное $p = 2$, то результат модуляции сопровождается низшая гармоника $\nu = p - 1 = 2 - 1 = 1$.

Реализации рациональной схемы обмотки на $6/4$ полюса препятствуют низшая гармоника $\nu = 1$. Так, амплитуды гармоник МДС двухслойной обмотки при $2p = 6$ в долях малых ступенек (рисунок 2)

$$a_\nu = \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi/2} F_x \cos \nu x dx = \frac{4}{3,14\nu} (3 \sin \nu 25^\circ + 3 \sin \nu 35^\circ + 3 \sin \nu 45^\circ + 3 \sin \nu 55^\circ - \sin \nu 65^\circ - \sin \nu 75^\circ - 2 \sin \nu 85^\circ).$$

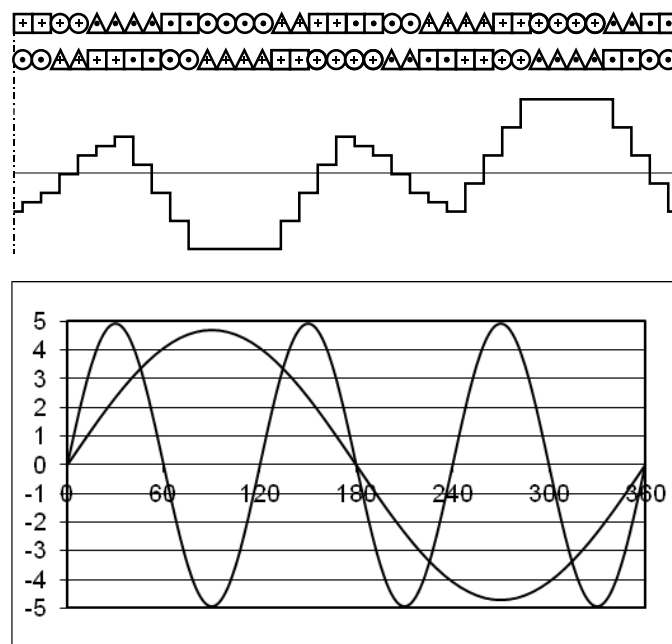
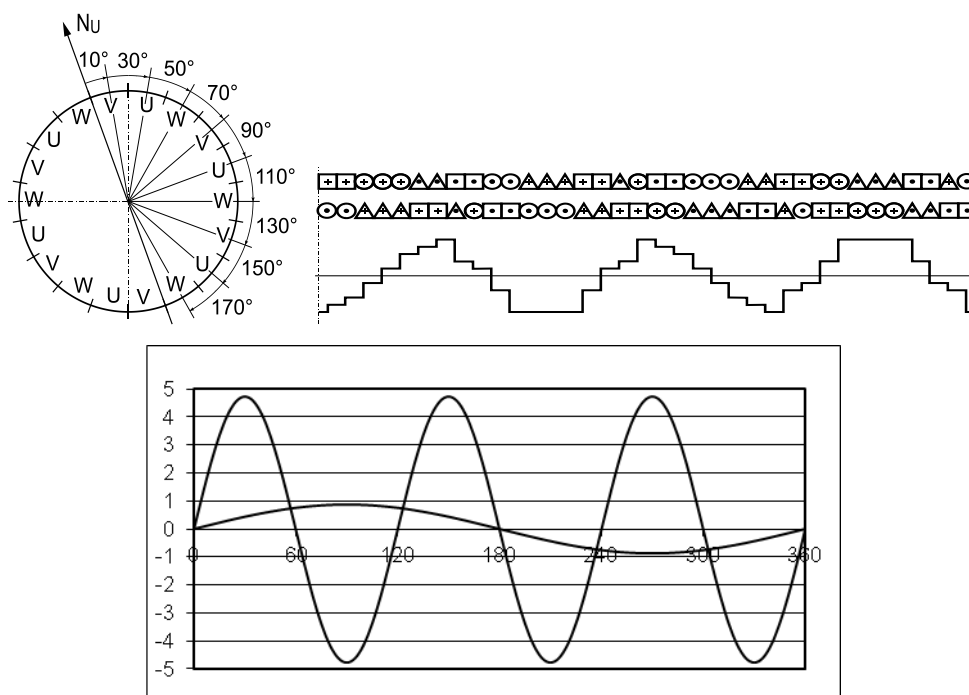


Рис. 2 - Основная и сопровождающая гармоники МДС при $2p = 6$

Принятое в [3-7] распределение катушек по тройкам соседних фазных зон пропорционально синусу угла расположения фазных зон, число которых соответствует большему числу полюсов (рисунок 3), также не решает проблему формирования рациональной схеме обмотки на $6/4$ полюса из-за значительной пульсации амплитуды низшей гармоники МДС при большем числе полюсов.



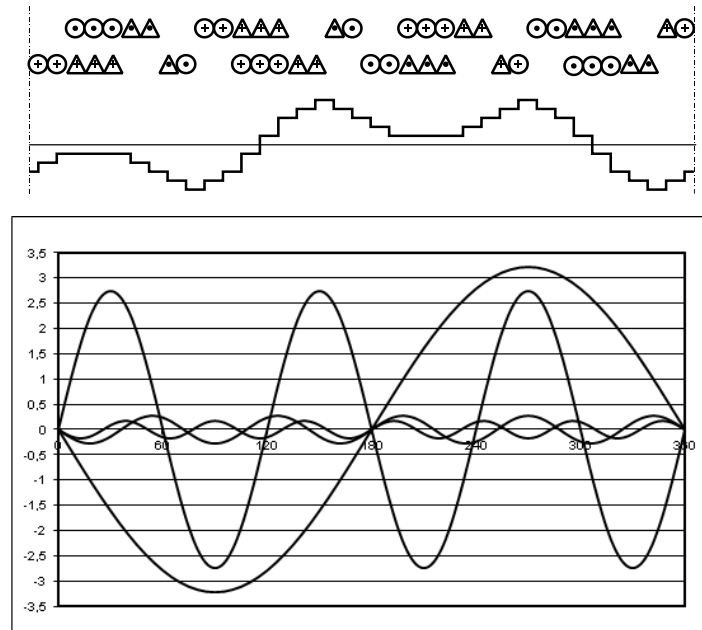


Рис. 3 - Схема ориентации фазных зон, МДС при нулевом значении тока в фазе U, МДС при максимуме тока в фазе U, гармоники МДС при $2p = 6$

Неизменное во времени хорошее качество МДС при $2p = 4$ позволяет изменением фазы токов в диаметрально расположенных частях фазных обмоток по принципу кругового перемещения трёхфазных токов выполнить фазную модуляцию МДС частей в виде (β и α - смещение фазных обмоток и смещение их частей):

$$\begin{aligned}
 F = F_m [& \cos x \cdot \sin(\omega t - 2\pi/3) + \cos(x - \alpha) \cdot \sin \omega t + \cos(x - \beta) \cdot \sin(\omega t - \\
 & 4\pi/3) + \cos(x - \beta - \alpha) \cdot \sin(\omega t - 2\pi/3) + \cos(x - 2\beta) \cdot \sin \omega t + \cos(x - 2\beta - \alpha) \cdot \\
 & \sin(\omega t - 4\pi/3)] = F_m/2 [\sin(\omega t - 2\pi/3 - x) + \sin(\omega t - 2\pi/3 + x) + \sin(\omega t - x + \alpha) \\
 & + \sin(\omega t + x - \alpha) + \sin(\omega t - 4\pi/3 - x + \beta) + \sin(\omega t - 4\pi/3 + x - \beta) + \sin(\omega t - 2\pi/3 \\
 & - x + \beta + \alpha) + \sin(\omega t - 2\pi/3 + x - \beta - \alpha) + \sin(\omega t - x + 2\beta) + \sin(\omega t + x - 2\beta) + \\
 & \sin(\omega t - 4\pi/3 - x + 2\beta + \alpha) + \sin(\omega t - 4\pi/3 + x - 2\beta - \alpha)].
 \end{aligned}$$

Модуляция при $\alpha = 180^\circ$ осуществляется переключением обмотки по схеме Δ/Y_Y без разрыва цепи питания двигателя.

При $\beta = 2\pi/3$ (соединение в треугольник в последовательности U, V, W):

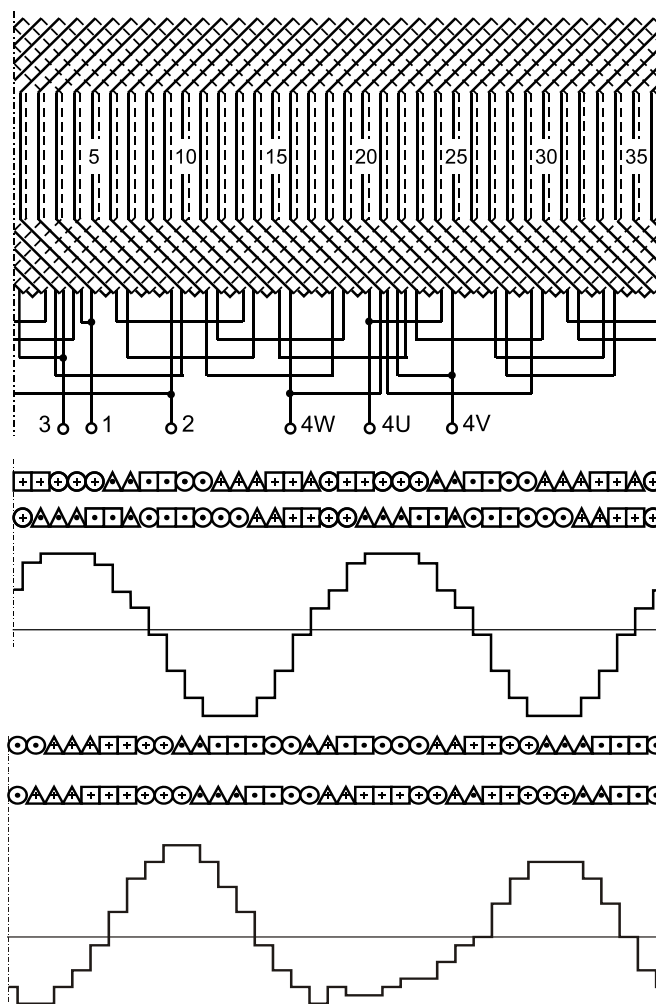
$$\begin{aligned}
 F &= 3/2 F_m [\sin(\omega t - x - 2\pi/3) + \sin(\omega t - x + \alpha)] = \\
 &= 3 F_m [\sin(\omega t - x - \pi/3 + \alpha/2) \cdot \cos(-\pi/3 - \alpha/2)] = \\
 &= 3 F_m [\sin(\omega t - x - \pi/3 + \alpha/2) \cdot \cos(\pi/3 + \alpha/2)] =
 \end{aligned}$$

$$= 3F_m \sin(\omega t - x + 30^\circ) \cos 150^\circ.$$

При $\beta = 4\pi/3$ (соединение в треугольник в последовательности U, W, V):

$$\begin{aligned} F &= 3/2 F_m [\sin(\omega t + x - 2\pi/3) + \sin(\omega t + x - \alpha)] = \\ &= 3F_m [\sin(\omega t + x - \pi/3 - \alpha/2) \cdot \cos(-\pi/3 + \alpha/2)] = \\ &= 3F_m [\sin(\omega t - x - \pi/3 - \alpha/2) \cdot \cos(\pi/3 - \alpha/2)] = \\ &= 3F_m \sin(\omega t - x - 120^\circ) \cos 30^\circ. \end{aligned}$$

Поскольку $|\cos 150^\circ| = \cos 30^\circ$, то не имеет значение, в какой последовательности фазные обмотки соединены в треугольник. При схеме Δ значение коэффициента распределения в 2/1,73 раза меньше по сравнению со схемой Y , рисунок 4 (при схеме Y выводы 1, 2, 3 замкнуты).



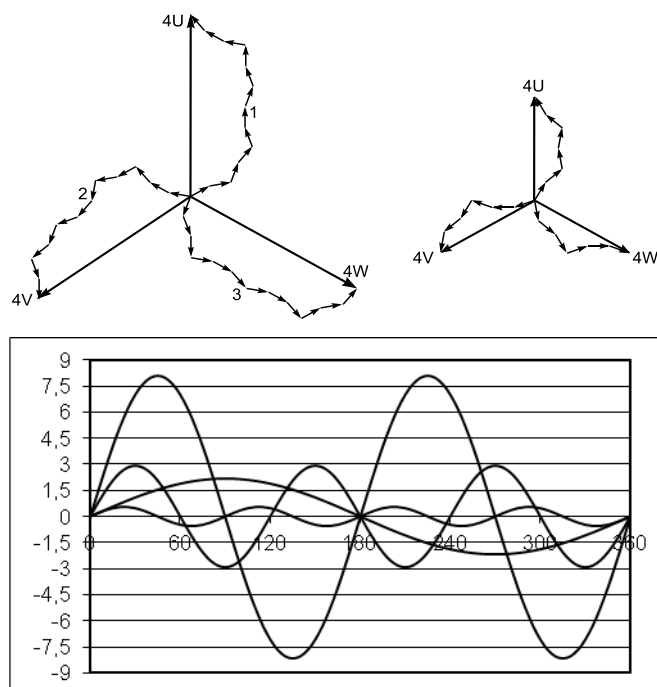


Рис. 4 - Схема четырехполюсной обмотки с шагом $y = 8$ ($k_{об\Delta}/k_{обYY} = 0,71/0,82$), МДС при YY и Δ , векторные диаграммы к определению коэффициента распределения, гармоники МДС при Δ

Симметрирование обмотки для основной гармоники $p = 2$ и для высшей гармоники $n = 3$ выполнено перестановкой однокатушечных групп в фазах V и W. Для низшей гармоник и многих других высших гармоник обмотка несимметричная, и токи внутри треугольника от ΔE фазных обмоток образуют потоки, практически компенсирующие потоки от МДС гармоник.

При переключении по схеме Δ/YY соотношение витков, потоков, индукций в воздушном зазоре и линейных намагничивающих токов:

$$\frac{w_{\Delta}}{w_{YY}} \approx \frac{U_{н\Delta} k_{обYY} \Phi_{YY}}{U_{нYY} k_{об\Delta} \Phi_{\Delta}} = \frac{380 \cdot 0,833 \cdot \Phi_{YY}}{220 \cdot 0,72 \cdot \Phi_{\Delta}} = 2;$$

$$\frac{\Phi_{\Delta}}{\Phi_{YY}} = 1; \quad \frac{B_{\delta\Delta}}{B_{\delta YY}} = \frac{\Phi_{\Delta}}{\Phi_{YY}} = 1;$$

$$\frac{I_{\mu\Delta l}}{I_{\mu YY l}} = \sqrt{3} \frac{I_{\mu\Delta}}{I_{\mu YY}} = \sqrt{3} \frac{B_{\delta\Delta} w_{YY} k_{обYY}}{B_{\delta YY} w_{\Delta} k_{об\Delta}} = \sqrt{3} \frac{1 \cdot 1 \cdot 0,833}{1 \cdot 2 \cdot 0,72} = 1.$$

При соединении фаз Δ значение коэффициента дифференциального рассеяния, определяющее значение составляющей индуктивного сопротивления статорной обмотки от потоков дифференциального рассеяния

$x_\mu \tau_\delta$, с достаточной точностью можно определить по амплитудам явно выраженных высших гармоник. Так, согласно гармоническому анализу МДС (без учёта скомпенсированной низшей гармоники)

$$\tau_{\delta\Delta} = \frac{\sum_{v=1}^{\infty} F_{vm}^2}{F_m^2} - 1 = \frac{8,12^2 + 2,91^2 + 0,57^2 + 0,1^2 + 0,19^2 + 0,13^2 + 0,24^2 + 0,1^2}{8,12^2} - 1 = 0,135.$$

С учетом других высших гармоник $\tau_{\delta\Delta} \approx 0,14$.

По той же методике при схеме YY $\tau_{\delta YY} \approx 0,013$.

Расчет пусковых токов двигателя на габарите АИР100S4 (таблиц 2).

Для него с однослойной обмоткой диаметрального шага $\tau_\delta = 0,14$ [2].

Таблица 2 - Параметры базового двигателя в относительных и именованных единицах (U_H/I_H)

Типоразмер двигателя	x_μ	В номинальном режиме				При пуске ($s = 1$)		
		R_1	x_1	R_2	x_2	$R_{2п}$	R_k	x_k
АИР100S4	2,2	0,078	0,079	0,053	0,13	0,067	0,14	0,14
	72	2,56	2,57	1,74	4,27	2,2	4,6	4,6

Для базового двигателя значение составляющей индуктивного сопротивления статорной обмотки $\tau_\delta x_\mu = 0,014 \cdot 72 \approx 1$ Ом.

Для модулированной обмотки при схеме YY $\tau_{\delta YY} x_\mu = 0,013 \cdot 72 = 0,94$ Ом и индуктивное сопротивление $x_{1YY} = (2,57 - 1 + 0,94 = 2,51$ Ом. При соединении фаз Δ $\tau_{\delta\Delta} x_\mu = 0,135 \cdot 216 = 29$ Ом, и индуктивное сопротивление обмотки $x_{1\Delta} = (2,57 - 1)3 + 29 = 33,7$ Ом. Параметр R_1 в таблице 3 учитывает увеличение в 1,2 раза числа витков модулированной обмотки ($k_{об} = 0,80$) по сравнению с обмоткой базового двигателя ($k_{об} = 0,96$).

Таблица 3 - Параметры двигателя АИР160S4 с модулированной обмоткой, Ом

Типоразмер двигателя	x_μ	В номинальном режиме			
		R_1	x_1	R_2	x_2
АИР100S4 YY	72	3,65	3,7	1,74	4,27
Δ	216	14,6	33,7	5,2	12,9

Для смежных гармоник $p = 2$ и $v = 3$ активные сопротивления роторной обмотки отличаются незначительно и относительный момент от гар-

моники ν с относительной амплитудой $F_{m\nu}/F_m$ можно определить, ориентируясь на параметры двигателя.

Скольжение ротора и относительный момент от гармоники $\nu = 3$:

$$s_{\nu=3} = 1 - (1 - s) \frac{\nu}{p} = 1 - (1 - s) \frac{3}{2} = 1,5s - 0,5;$$

$$\frac{M_{\nu=3}}{M} = \frac{p}{\nu} \cdot \frac{F_{m\nu}^2}{F_m^2} \cdot \frac{s_\nu}{s} \frac{R_2'^2 + s^2(x_\mu + x_2')^2}{R_{2\nu}'^2 + (x_\mu \cdot (p/\nu))^2 + x_2'^2} =$$

$$\approx \frac{2}{3} \cdot 0,358^2 \cdot \frac{1,5s - 0,5}{s} \cdot \frac{5,2^2 + s^2(216 + 12,9)^2}{5,2^2 + s_\nu^2(96 + 12,9)^2} =$$

$$= 0,0854 \cdot \frac{(1,5s - 0,5) \cdot (27 + s^2 \cdot 52395)}{s(27 + (1,5s - 0,5)^2 \cdot 11859)}.$$

Согласно таблице 2 можно принять, что активное сопротивление роторной обмотки в процессе пуска уменьшается по закону $(1 + 0,26s)$, а индуктивного сопротивления короткого замыкания увеличивается по закону $(1 - 0,46s)$.

Моменты двигателя с учетом действия прямовращающейся высшей гармоники (рисунок 5):

$$M_\Delta = \left(\frac{mU_\Delta^2 R_{2\Delta}' s(1 + 0,26s)}{\omega_1 \left[(sR_{1\Delta} + (1 + 0,26s)R_{2\Delta}')^2 + s^2(1 - 0,46s)(x_{1\Delta} + x_{2\Delta}')^2 \right]} \right)$$

$$= \frac{3 \cdot 380^2 \cdot 5,2s(1 + 0,26s)}{157(s^2(213 + 2171(1 - 0,46s)) + 152s(1 + 0,26s) + 27(1 + 0,26s)^2)} =$$

$$= \left(\frac{14348s(1 + 0,26s)}{s^2(213 + 2171(1 - 0,46s)) + 152s(1 + 0,26s) + 27(1 + 0,26s)^2} + \right.$$

$$\left. + \frac{14348s(1 + 0,26s)}{s^2(213 + 2171(1 - 0,46s)) + 152s(1 + 0,26s) + 27(1 + 0,26s)^2} \cdot \right.$$

$$\left. \cdot 0,0854 \cdot \frac{(1,5s - 0,5) \cdot (27 + s^2 \cdot 52395)}{s(27 + (1,5s - 0,5)^2 \cdot 11859)} \right);$$

$$M_{YY} = \frac{mU_{YY}^2 R'_{2YY} s \cdot (1 + 0,26s)}{\omega_1 \left[(sR_{1YY} + (1 + 0,26s)R'_{2YY})^2 + s^2 (1 - 0,46s)(x_{1YY} + x'_{2YY})^2 \right]} =$$

$$= \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 1,74s \cdot (1 + 0,26s)}{157(s^2 s^2 (13,3 + 46(1 - 0,46s)) + 12,7s(1 + 0,26s) + 3(1 + 0,26s)^2)} =$$

$$= \frac{1609s(1 + 0,26s)}{(s^2 (13,3 + 46(1 - 0,46s)) + 12,7s(1 + 0,26s) + 3(1 + 0,26s)^2)}.$$

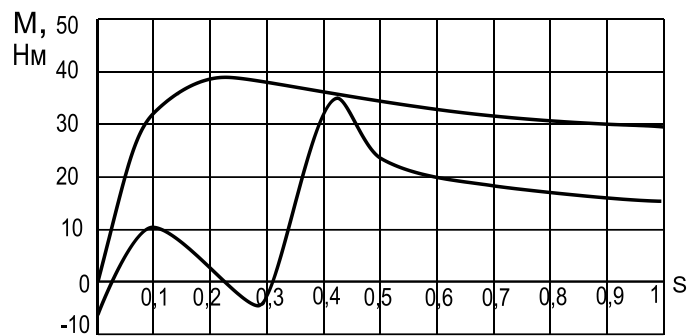


Рис. 5 - Вид моментов при схемах YY и Δ

Схема обмотки двигателя с 48 пазами статора показана на рисунке 6.

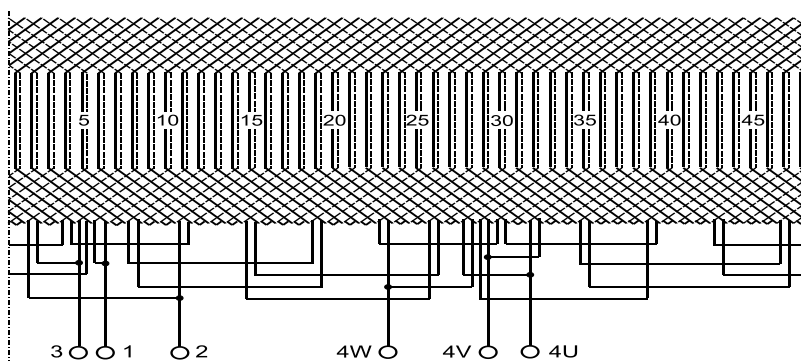


Рис. 6 - Схема четырехполюсной обмотки, Z = 48

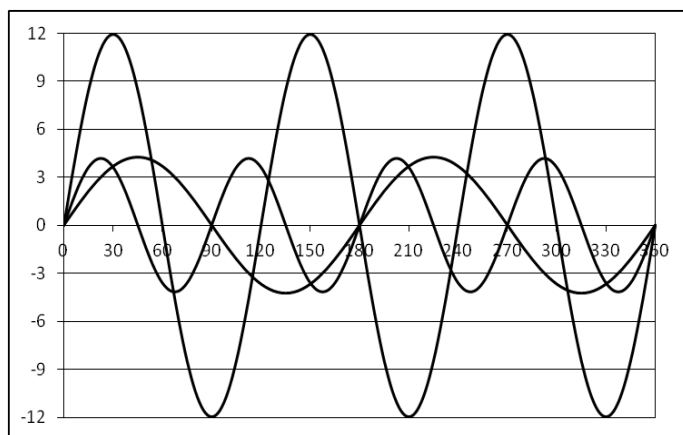
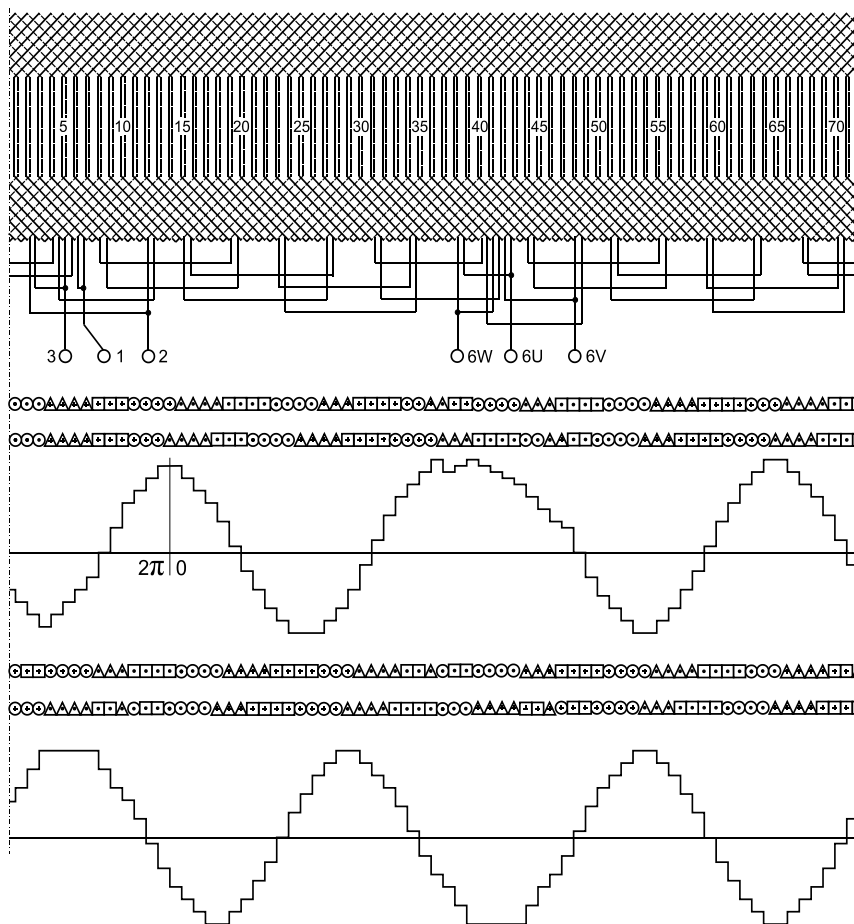


Рис. 7 - Схема и МДС шестиполюсной обмотки, ($k_{об\Delta}/k_{обYY} = 0,79/0,892$), гармоники МДС при схеме Δ

Формирование шестиполюсной обмотки с переключением Δ/Y (рисунок 7) выполнено также на основе синусоидального распределения катушек по фазным зонам, соответствующим смежному большему числу полюсов.

Расчет пусковых токов двигателя на габарите АИР225М6. Данные АИР225М6 приведены в таблице 4.

Таблица 4 - Параметры базового двигателя в относительных и именованных единицах ($U_H/I_{1H} = 220/73 = 3$)

Типоразмер	x_{μ}	В номинальном режиме	При пуске ($s = 1$)
------------	-----------	----------------------	-----------------------

двигателя		R_1	x_1	R_2	x_2	$R_{2п}$	R_K	x_K
АИР225М6	3,25	0,042	0,10	0,019	0,13	0,035	0,078	0,16
	9,75	0,127	0,45	0,103	0,39	0,105	0,234	0,48

Для базового двигателя значение составляющей индуктивного сопротивления статорной обмотки $\tau_{\partial}x_{\mu} = 0,00644 \cdot 9,75 = 0,06$ Ом.

Для двигателя с модулированной обмоткой при соединении фаз Y-Y $\tau_{\partial Y Y}x_{\mu} = 0,0348 \cdot 9,75 \approx 0,34$ Ом, индуктивное сопротивление $x_{1 Y Y} = (0,45 - 0,06 + 0,34) = 0,73$ Ом (таблица 5).

При соединении фаз в треугольник значение $\tau_{\partial \Delta}x_{\mu} = 0,1 \cdot 29,25 \approx 2,9$ Ом и индуктивное сопротивление статорной обмотки $x_{1 \Delta} = (0,45 - 0,06)3 + 2,9 = 4,1$ Ом.

Таблица 5 - Параметры двигателя АИР225М6 с модулированной обмоткой, Ом

Типоразмер двигателя	x_{μ}	В номинальном режиме			
		R_1	x_1	R_2	x_2
АИР225М6 Y-Y	9,75	0,127	0,73	0,103	0,39
Δ	29,25	0,51	4,1	0,31	1,17

Скольжение ротора и относительный момент от $v = 4$, рисунок 14:

$$s_{v=4} = 1 - (1 - s) \frac{v}{p} = 1 - (1 - s) \frac{4}{3} = 1,333s - 0,333.$$

$$\frac{M_{v=4}}{M} = \frac{p}{v} \cdot \frac{F_{mv}^2}{F_m^2} \cdot \frac{s_v}{s} \cdot \frac{R_2'^2 + s^2(x_{\mu} + x_2')^2}{R_{2v}'^2 + (x_{\mu} \cdot (p/v)^2 + x_2')^2} =$$

$$= \frac{3}{4} \cdot (0,34)^2 \cdot \frac{1,333s - 0,333}{s} \cdot \frac{0,31^2 + s^2(29,25 + 1,2)^2}{0,3^2 + s_v^2(16,45 + 1,2)^2} =$$

$$= 0,085 \cdot \frac{(1,333s - 0,333) \cdot (0,096 + s^2 \cdot 927,2)}{s \cdot (0,09 + (1,333s - 0,333)^2 \cdot 311,5)};$$

Согласно таблице 4 активное сопротивление роторной обмотки изменяется по закону $(1 + 0,84s)$, а индуктивное сопротивление короткого замыкания по закону $(1 - 0,4s)$. Моменты двигателя при пуске с учетом действия высшей гармоники, рисунок 8:

$$\begin{aligned}
 M_{\Delta} &= \frac{mU_{\Delta}^2 R'_{2\Delta} s(1+0,84s)}{\omega_1 \left[(sR_{1\Delta} + (1+0,84s)R'_{2\Delta})^2 + s^2(1-0,4s)(x_{1\Delta} + x'_{2\Delta})^2 \right]} = \\
 &= \frac{mU_{\Delta}^2 R'_{2\Delta} s(1+0,84s)}{\omega_1 \left[(s0,51 + (1+0,84s)0,31)^2 + s^2(1-0,4s)(4,1+1,17)^2 \right]} = \\
 &= \frac{3 \cdot 380^2 \cdot 0,31s(1+0,84s)}{104,7(s^2(0,26+27,8(1-0,4s)) + 0,316s(1+0,84s) + 0,096(1+0,84s)^2)} = \\
 &= \frac{1283s(1+0,84s)}{s^2(0,26+27,8(1-0,5s)) + 0,316s(1+0,84s) + 0,096(1+0,84s)^2} + \\
 &+ \left(\frac{1283s(1+0,84s)}{s^2(0,26+27,8(1-0,5s)) + 0,316s(1+0,84s) + 0,096(1+0,84s)^2} \right) \cdot \\
 &\quad \cdot 0,085 \cdot \frac{(1,333s - 0,333) \cdot (0,096 + s^2 \cdot 925,4)}{s \cdot (0,09 + (1,333s - 0,333)^2 \cdot 310,5)} \\
 \\
 M_{YY} &= \frac{mU_{YY}^2 R'_{2YY} s \cdot (1+0,84s)}{\omega_1 \left[(sR_{1YY} + (1+0,84s)R'_{2YY})^2 + s^2(1-0,5s)(x_{1YY} + x'_{2YY})^2 \right]} = \\
 &= \frac{mU_{YY}^2 R'_{2YY} s \cdot (1+0,84s)}{\omega_1 \left[(s0,127 + (1+0,84s)0,103)^2 + s^2(1-0,4s)(0,7+0,39)^2 \right]} = \\
 &= \frac{3 \cdot 220 \cdot 0,103s \cdot (1+0,84s)}{104,7(s^2(0,0162+1,12(1-0,4s)) + 0,026s(1+0,84s) + 0,011(1+0,84s)^2)} = \\
 &= \frac{143s(1+0,84s)}{(s^2(0,0162+1,19(1-0,4s)) + 0,026s(1+0,84s) + 0,011(1+0,84s)^2)}
 \end{aligned}$$

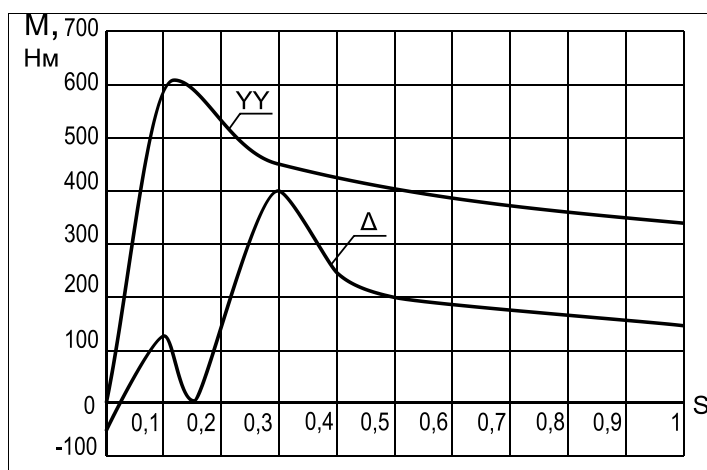


Рис. 8 - Вид моментов при схемах YY и Δ

Вывод

Модулированные статорные обмотки на 4 и 6 полюсов позволяют переключением по схеме Δ/YY изменять частоту вращения двигателей в приводе вентиляторов без разрыва цепи питания.

Литература

1. Асинхронные генераторы для систем автономного электроснабжения. Часть 1. Обоснование параметров асинхронного генератора / Н.И. Богатырев, В.Н. Ванурин, А.С. Креймер, П.П. Екименко П.П. // Научный журнал КубГАУ [Электронный ресурс]. - Краснодар: КубГАУ, 2010. - №05(59). - Шифр Информрегистра: 04201000012/0095. - Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2010/05/26/p26.asp>.
2. Асинхронные генераторы для систем автономного электроснабжения. Часть 2. Базовая теория формирования статорных обмоток асинхронных генераторов и методы расчета обмоток / Н.И. Богатырев, В.Н. Ванурин, А.С. Креймер, П.П. Екименко П.П. // Научный журнал КубГАУ [Электронный ресурс]. - Краснодар: КубГАУ, 2010. - №06(60). - Шифр Информрегистра: 04201000012/0116. - Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2010/06/31/p31.asp>.
3. Богатырев Н.И. Анализ и синтез параметров обмоток асинхронного генератора [Текст] / Н.И. Богатырев, П.П. Екименко, А.В. Синицын, Я.А. Ильченко, В.Н. Ванурин // Механизация и электрификация сел. хоз-ва. – 2007. - №8. - С. 33 – 35.
4. Богатырев Н.И. Модулированные обмотки асинхронных генераторов для систем автономного электроснабжения / Н.И. Богатырев – Тр. / Куб. ГАУ; Вып. № 3(24). – Краснодар, 2010. – С. 172 – 178.
5. Богатырев Н.И. Параметры и характеристики электрических машин переменного тока: моногр / Н.И. Богатырев, В.Н. Ванурин, П.П. Екименко: - Краснодар, 2011 - 256 с.
6. Богатырев Н.И. Синтез статорных обмоток асинхронных генераторов для систем автономного электроснабжения [Текст] / Н.И. Богатырев – Тр. / Куб. ГАУ; Вып. № 6(33). – Краснодар, 2011. – С. 196 – 200.
7. Богатырев Н.И. Электрические машины переменного тока / Н.И. Богатырев, В.Н. Ванурин, К.А. А. Джанибеков – Краснодар: 2011. – 224 с.
8. Богатырев Н.И. Электромеханическое преобразование энергии в электрических машинах переменного тока. Ч. 1. [Текст] / Н.И. Богатырев – Тр. / Куб. ГАУ; Вып. № 3(7). – Краснодар, 2007. – С. 173 – 179.
9. Богатырев Н.И. Электромеханическое преобразование энергии во вращающихся электрических машинах переменного тока. Ч. 2. [Текст] / Н.И. Богатырев – Тр. / Куб. ГАУ; Вып. № 3(7). – Краснодар, 2007. – С. 193 – 198.
10. Ванурин В.Н. Статорные обмотки асинхронных электрических машин / В.Н. Ванурин: – Санкт-Петербург: «Лань», 2014. – 176 с.
11. Ванурин В.Н. Электрические машины / В.Н. Ванурин: - Санкт-Петербург: «Лань», 2016. – 304 с.
12. Патент 2225531 МКП F 03 D 7/04. Ветроэнергетическая установка / Богатырев Н.И., Ванурин В.Н., Креймер А.С. и др. заявитель и патентообладатель Кубанский госагроуниверситет. – № 2002117609/06; Заявл. 01.07.02; Оpubл. 10.03.04; Бюл. № 7– 12 с.
13. Патент 2248082, МПК Н 02 К 17/14 Статорная обмотка двухчастотного асинхронного генератора / Богатырев Н.И., Ванурин В.Н., Оськин С.В. и др. (РФ) заявитель и патентообладатель Кубанский госагроуниверситет. – № 2003126793/11; Заявл. 01.09.03; Оpubл. 10.03.05; Бюл. № 7. – 12 с.
14. Патент 2248083, МПК Н 02 К 17/14 Статорная обмотка двухчастотного асинхронного генератора / Богатырев Н.И., Ванурин В.Н., Григораш О.В. и др. (РФ) заявитель и патентообладатель Кубанский госагроуниверситет. – № 2003126833/11; Заявл. 01.09.03; Оpubл. 10.03.05; Бюл. № 7. – 12 с.
15. Патент 2249900, МПК Н 02 К 17/14 Статорная обмотка двухчастотного асинхронного генератора / Богатырев Н.И., Ванурин В.Н., Султанов Г.А. и др. (РФ) заявитель и патентообладатель Кубанский госагроуниверситет. – № 2003126833/11; Заявл. 01.09.03; Оpubл. 10.03.05; Бюл. № 7. – 12 с.

тель и патентообладатель Кубанский госагроуниверситет. – № 2003126791/11; Заявл. 01.09.03; Оpubл. 10.04.05; Бюл. № 10. – 4 с.

16. Патент 2249901, МПК Н 02 К 17/14 Статорная комбинированная обмотка асинхронного генератора / Богатырев Н.И., Ванурин В.Н., Креймер А.С. и др. заявитель и патентообладатель Кубанский госагроуниверситет. – № 2003126792/11; Заявл. 01.09.03; Оpubл. 10.04.05; Бюл. № 10. – 6 с.

17. Патент 2249903, МПК Н 02 К 17/14 Статорная обмотка двухчастотного асинхронного генератора / Богатырев Н.И., Ванурин В.Н., Темников В.Н. и др. (РФ) заявитель и патентообладатель Кубанский госагроуниверситет. – № 2003126832/11; Заявл. 01.09.03; Оpubл. 10.04.05; Бюл. № 10. – 4 с.

18. Патент 2263385, МПК Н 02 К 17/14 Двухслойная статорная обмотка двухполюсного асинхронного генератора / Богатырев Н.И., Ванурин В.Н., Вронский О.В., Креймер А.С. и др. заявитель и патентообладатель Кубанский госагроуниверситет. – № 2004108756/09; Заявл. 24.03.04; Оpubл. 27.10.05; Бюл. № 30. – 4 с.

19. Патент 2281524, МПК G 01 R 31/34. Электрифицированный стенд для исследования электрических машин / Богатырев Н.И., Курзин Н.Н., Григораш О.В., Креймер А.С. и др. заявитель и патентообладатель Кубанский госагроуниверситет. – № 2002123027/28; Заявл. 27.08.02; Оpubл. 10.08.06; Бюл. № 22. – 6 с.

20. Патент 2310967, МПК H02K 17/14, H02K 3/28 Двухслойная статорная обмотка четырехполюсной асинхронной машины / Богатырев Н.И., Ванурин В.Н., Темников В.Н., Креймер А.С. заявитель и патентообладатель Кубанский госагроуниверситет. – № 2006119237/09 (020903); Заявл. 01.06.06; Оpubл. 20.11.07; Бюл. № 32. – 7 с.

21. Патент 2476976, МПК H02K 17/14 Статорная обмотка сварочного асинхронного генератора / Богатырев Н.И., Ванурин В.Н., Вронский А.В., Креймер А.С. и др. заявитель и патентообладатель Кубанский госагроуниверситет. – № 2010131639/07; Заявл. 27.07.10; Оpubл. 27.02.2013; Бюл. № 6. – 7 с.

22. Патент 2566147, МПК F25B 11/00 Газотурбогенератор / Богатырев Н.И., Моргунов С.М., Креймер А.С. и др. заявитель и патентообладатель Кубанский госагроуниверситет. – 2014124123/06; Заявл. 11.06.2014; Оpubл. 20.10.2015; Бюл. № 29. – 8 с.

23. Синтез обмоток статора для асинхронных генераторов и двигателей / Н.И. Богатырев, В.Н. Ванурин, Н.С. Баракин, Д.Ю. Семернин // Научный журнал КубГАУ [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2011. – №74(10). – Шифр Информрегистра: 04201000012/0116. - Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2011/10/pdf/74/p26.asp>.

24. Модулированные статорные обмотки асинхронных генераторов / Н.И. Богатырев, В.Н. Ванурин, О.В. Вронский и др., // Учебно-методическое пособие для самостоятельной работы студентов по специальности 31.14.00 / ФГОУ ВПО Кубанский государственный аграрный университет; Всероссийский ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский и проектно-технологический институт механизации и электрификации сельского хозяйства. Краснодар, 2004.

References

1. Asinhronnye generatory dlja sistem avtonomnogo jelektrosnabzhenija. Chast' 1. Obosnovanie parametrov asinhronnogo generatora / N.I. Bogatyrev, V.N. Vanurin, A.S. Krejmer, P.P. Ekimenko P.P. // Nauchnyj zhurnal KubGAU [Jelektronnyj resurs]. - Краснодар: KubGAU, 2010. - №05(59). - Shifr Informregistra: 04201000012/0095. - Rezhim dostupa: <http://ej.kubagro.ru/2010/05/26/p26.asp>.

2. Asinhronnye generatory dlja sistem avtonomnogo jelektrosnabzhenija. Chast' 2. Bazovaja teorija formirovanija statornyh obmotok asinhronnyh generatorov i metody rascheta obmotok / N.I. Bogatyrev, V.N. Vanurin, A.S. Krejmer, P.P. Ekimenko P.P. // Nauchnyj

zhurnal KubGAU [Jelektronnyj resurs]. - Krasnodar: KubGAU, 2010. - №06(60). - Shifr Informregistra: 04201000012/0116. - Rezhim dostupa: <http://ej.kubagro.ru/2010/06/31/p31.asp>.

3. Bogatyrev N.I. Analiz i sintez parametrov obmotok asinhronnogo generatora [Tekst] / N.I. Bogatyrev, P.P. Ekimenko, A.V. Sinicyn, Ja.A. Il'chenko, V.N. Vanurin // Mehanizacija i jelektrifikacija sel. hoz-va. – 2007. - №8. - S. 33 – 35.

4. Bogatyrev N.I. Modulirovannye obmotki asinhronnyh generatorov dlja sistem avtonomnogo jelektrosnabzhenija / N.I. Bogatyrev – Tr. / Kub. GAU; Vyp. № 3(24). – Krasnodar, 2010. – S. 172 – 178.

5. Bogatyrev N.I. Parametry i harakteristiki jelektricheskikh mashin peremennogo toka: monogr / N.I. Bogatyrev, V.N. Vanurin, P.P. Ekimenko: - Krasnodar, 2011 - 256 s.

6. Bogatyrev N.I. Sintez statornyh obmotok asinhronnyh generatorov dlja sistem avtonomnogo jelektrosnabzhenija [Tekst] / N.I. Bogatyrev – Tr. / Kub. GAU; Vyp. № 6(33). – Krasnodar, 2011. – S. 196 – 200.

7. Bogatyrev N.I. Jelektricheskie mashiny peremennogo toka / N.I. Bogatyrev, V.N. Vanurin, K.A. A. Dzhanibekov – Krasnodar: 2011. – 224 s.

8. Bogatyrev N.I. Jelektromehaničeskoe preobrazovanie jenerгии v jelektricheskikh mashinah peremennogo toka. Ch. 1. [Tekst] / N.I. Bogatyrev – Tr. / Kub. GAU; Vyp. № 3(7). – Krasnodar, 2007. – S. 173 – 179.

9. Bogatyrev N.I. Jelektromehaničeskoe preobrazovanie jenerгии vo vrashhajushhihsja jelektricheskikh mashinah peremennogo toka. Ch. 2. [Tekst] / N.I. Bogatyrev – Tr. / Kub. GAU; Vyp. № 3(7). – Krasnodar, 2007. – S. 193 – 198.

10. Vanurin V.N. Statornye obmotki asinhronnyh jelektricheskikh mashin / V.N. Vanurin: – Sankt-Peterburg: «Lan'», 2014. – 176 s.

11. Vanurin V.N. Jelektricheskie mashiny / V.N. Vanurin: - Sankt-Peterburg: «Lan'», 2016. – 304 s.

12. Patent 2225531 MKP F 03 D 7/04. Vetrojenergetičeskaja ustanovka / Bogatyrev N.I., Vanurin V.N., Krejmer A.S. i dr. zajavitel' i patentoobladatel' Kubanskij gosagrouniversitet. – № 2002117609/06; Zajavl. 01.07.02; Opubl. 10.03.04; Bjul. № 7– 12 c.

13. Patent 2248082, MPK H 02 K 17/14 Statornaja obmotka dvuhchastotnogo asinhronnogo generatora / Bogatyrev N.I., Vanurin V.N., Os'kin S.V. i dr. (RF) zajavitel' i patentoobladatel' Kubanskij gosagrouniversitet. – № 2003126793/11; Zajavl. 01.09.03; Opubl. 10.03.05; Bjul. № 7. – 12 c.

14. Patent 2248083, MPK H 02 K 17/14 Statornaja obmotka dvuhchastotnogo asinhronnogo generatora / Bogatyrev N.I., Vanurin V.N., Grigorash O.V. i dr. (RF) zajavitel' i patentoobladatel' Kubanskij gosagrouniversitet. – № 2003126833/11; Zajavl. 01.09.03; Opubl. 10.03.05; Bjul. № 7. – 12 c.

15. Patent 2249900, MPK H 02 K 17/14 Statornaja obmotka dvuhchastotnogo asinhronnogo generatora / Bogatyrev N.I., Vanurin V.N., Sultanov G.A. i dr. (RF) zajavitel' i patentoobladatel' Kubanskij gosagrouniversitet. – № 2003126791/11; Zajavl. 01.09.03; Opubl. 10.04.05; Bjul. № 10. – 4 c.

16. Patent 2249901, MPK H 02 K 17/14 Statornaja kombinirovannaja obmotka asinhronnogo generatora / Bogatyrev N.I., Vanurin V.N., Krejmer A.S. i dr. zajavitel' i patentoobladatel' Kubanskij gosagrouniversitet. – № 2003126792/11; Zajavl. 01.09.03; Opubl. 10.04.05; Bjul. № 10. – 6 c.

17. Patent 2249903, MPK H 02 K 17/14 Statornaja obmotka dvuhchastotnogo asinhronnogo generatora / Bogatyrev N.I., Vanurin V.N., Temnikov V.N. i dr. (RF) zajavitel' i patentoobladatel' Kubanskij gosagrouniversitet. – № 2003126832/11; Zajavl. 01.09.03; Opubl. 10.04.05; Bjul. № 10. – 4 c.

18. Patent 2263385, MPK H 02 K 17/14 Dvuhslojnaja statornaja obmotka dvuhpoljusnogo asinhronnogo generatora / Bogatyrev N.I., Vanurin V.N., Vronskij O.V., Krejmer

A.S. i dr. zajavitel' i patentoobladatel' Kubanskij gosagrouniversitet. – № 2004108756/09; Zajavl. 24.03.04; Opubl. 27.10.05; Bjul. № 30. – 4 c.

19. Patent 2281524, MPK G 01 R 31/34. Jelektrificirovannyj stend dlja issledovanija jelektricheskikh mashin / Bogatyrev N.I., Kurzin N.N., Grigorash O.V., Krejmer A.S. i dr. zajavitel' i patentoobladatel' Kubanskij gosagrouniversitet. – № 2002123027/28; Zajavl. 27.08.02; Opubl. 10.08.06; Bjul. № 22. – 6 c.

20. Patent 2310967, MPK N02K 17/14, N02K 3/28 Dvuhslojnaja statornaja obmotka chetyrehpoljusnoj asinhronnoj mashiny / Bogatyrev N.I., Vanurin V.N., Temnikov V.N., Krejmer A.S. zajavitel' i patentoobladatel' Kubanskij gosagrouniversitet. – № 2006119237/09 (020903); Zajavl. 01.06.06; Opubl. 20.11.07; Bjul. № 32. – 7 c.

21. Patent 2476976, MPK H02K 17/14 Statornaja obmotka svarochnogo asinhronnogo generatora / Bogatyrev N.I., Vanurin V.N., Vronskij A.V., Krejmer A.S. i dr. zajavitel' i patentoobladatel' Kubanskij gosagrouniversitet. – № 2010131639/07; Zajavl. 27.07.10; Opubl. 27.02.2013; Bjul. № 6. – 7 c.

22. Patent 2566147, MPK F25B 11/00 Gazoturbogenerator / Bogatyrev N.I., Morgun S.M., Krejmer A.S. i dr. zajavitel' i patentoobladatel' Kubanskij gosagrouniversitet. – 2014124123/06; Zajavl. 11.06.2014; Opubl. 20.10.2015; Bjul. № 29. – 8 c.

23. Sintez obmotok statora dlja asinhronnyh generatorov i dvigatelej / N.I. Bogatyrev, V.N. Vanurin, N.S. Barakin, D.Ju. Semernin // Nauchnyj zhurnal KubGAU [Jelektronnyj resurs]. – Krasnodar: KubGAU, 2011. – №74(10). – Shifr Informregistra: 04201000012/0116. - Rezhim dostupa: <http://ej.kubagro.ru/2011/10/pdf/74/p26.asp>.

24. Modulirovannye statornye obmotki asinhronnyh generatorov / N.I. Bogatyrev, V.N. Vanurin, O.V. Vronskij i dr., // Uchebno-metodicheskoe posobie dlja samostojatel'noj raboty studentov po special'nosti 31.14.00 / FGOU VPO Kubanskij gosudarstvennyj agarnyj universitet; Vserossijskij ordena Trudovogo Krasnogo Znameni nauchno-issledovatel'skij i proektno-tehnologicheskij institut mehanizacii i jelektrifikacii sel'skogo hozjajstva. Krasnodar, 2004.