

## МОДЕРНИЗАЦИЯ УПРАВЛЯЕМЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ГЕРМЕТИЧНЫХ КОМПРЕССОРОВ

*Запропоновано технічне рішення, що дає змогу поліпшити малогабаритні показники електропривода герметичного компресора торговельного холодильного обладнання. На прикладі двигунів серії 4А дана порівняльна оцінка енергетичних показників і матеріалоемності трифазних двополюсних та скорочених багатопольсних високочастотних двигунів.*

*Предлагается техническое решение, позволяющее улучшить массогабаритные показатели электропривода герметичного компрессора торгового холодильного оборудования. На примере двигателей серии 4А дана сравнительная оценка энергетических показателей и материалоемкости трехфазных двухполюсных и укороченных многополюсных высокочастотных двигателей.*

*The technical solution permitting to improve the mass and size parameters of the hermetic compressor electric drive of the commercial refrigeration equipment is suggested. On example of the 4A series engines the comparative assessment of energy parameters and material capacity of three-phase bipolar and truncated multiple high-frequency engines is given.*

В качестве электропривода герметичных компрессоров малого торгового холодильного оборудования (ТХО) часто используются однофазные асинхронные двигатели (ОАД) с повышенным сопротивлением пусковой обмотки. Широкое применение ОАД обусловлено возможностью непосредственного их подключения к однофазной питающей сети, а также невысокими требованиями к пусковым, перегрузочным и энергетическим характеристикам двигателей.

Трехфазные асинхронные двигатели (ТАД), несмотря на заметно лучшие энергетические и массогабаритные показатели, имеют ограниченное применение в данном сегменте холодильного оборудования, что связано с необходимостью использования трехфазной питающей сети. Поэтому ТАД находят применение в компрессорах мощностью более 1 кВт. Подключение их к однофазной питающей сети осуществляется с использованием фазосдвигающих элементов.

Показателями, характеризующими энергетическую эффективность электроустановок, в том числе ТХО, являются коэффициент полезного действия (КПД) и коэффициент мощности ( $\cos\phi$ ), определяющие основные эксплуатационные расходы [5]. Затраты на изготовление зависят в основном от

материалоемкости установки  $G$ . Для рассматриваемых электродвигателей материалоемкость представляет собой комплексный показатель, в который входят: масса меди обмоточного провода  $G_m$ , масса алюминия короткозамкнутой обмотки ротора  $G_a$ , масса стали статора  $G_s$  и ротора  $G_r$ . Стоимость конструкционных и изоляционных материалов составляет примерно 25-30% стоимости всех материалов, из которых изготовлен двигатель, поэтому может не рассматриваться.

Однофазные асинхронные двигатели, применяемые в ТХО, имеют весьма невысокие энергетические показатели [6]: КПД – порядка 0,6...0,74,  $\cos\phi$  – 0,55...0,7. Массогабаритные показатели ОАД также невысоки. Для двухполюсных ОАД серий ДХМ, ДГ и ДАО общая масса стали статора и ротора колеблется от 3 до 5,5 кг; общая масса меди обмоток – 0,66...1,25 кг. Для сравнения – двухполюсные ТАД общепромышленного назначения серии 4А мощностью до 1 кВт имеют немного более высокие энергетические показатели [1]: КПД – 0,6...0,68,  $\cos\phi$  – 0,7...0,77, и низкую материалоемкость (общая масса стали статора и ротора – 3,5...2,1 кг; общая масса меди обмоток – 0,4...0,54 кг).

Применение специальных схем включения ТАД в однофазную сеть с использованием пусковых элементов является нецелесообразным из-за снижения энергетических

характеристик и надежности привода в целом [1].

В данной статье рассмотрены ранее недостаточно освещенные в литературных источниках, например [7, 9], особенности работы герметичного компрессора с ТАД совместно с преобразователем частоты (ПЧ). Применение ПЧ позволяет сохранить (а в отдельных случаях увеличить) энергетические преимущества ТАД перед ОАД и при этом улучшить ряд технико-экономических и эксплуатационных показателей компрессора, обеспечить при необходимости возможность плавного регулирования холодопроизводительности ТХО.

Возможная экономия активных материалов (стали и меди) и улучшение энергетических характеристик при использовании системы ПЧ-ТАД по сравнению с "релейным" управлением ОАД компрессоров ТХО является несомненным достоинством такой системы. Существенный недостаток, из-за которого система ПЧ-ТАД практически не применяется в ТХО – стоимость серийных ПЧ, составляющая, в лучшем случае, около 20 % от стоимости всего ТХО. Возникает необходимость создания более простых решений [8], которые позволили бы снизить затраты на изготовление и эксплуатацию.

Цель статьи состоит в анализе применения для герметичных компрессоров ТХО вместо двухполюсных ТАД четырех- и шестиполюсных ТАД. При этом питание их переменным током частотой 100 и 150 Гц, соответственно, будет осуществляться при помощи ПЧ.

Сравнительные экспериментальные исследования подобного плана для конкретных типов компрессоров крайне затруднительны, так как возникает необходимость изготовления в единичных (экспериментальных) экземплярах двух-, четырех- и шестиполюсных ТАД с такими же посадочными местами, как и у встроенного в компрессор ОАД. Кроме этого установка новых ТАД в компрессор требует проведения многих технологических операций (обезжиривание, осушка, герметизация, аргоно-дуговая сварка, заполнение агентом, маслом и др.), которые возможно осуществить только в заводских условиях. Поэтому применим метод аналогий для геометрически подобных машин [5] и будем использовать технические данные общепромышленных ТАД серии 4А.

В качестве базовых для рассмотрения примем ТАД серии 4А основного назначения (табл. 1) с одинаковыми высотой оси вращения (63 мм), длиной статорного пакета (56 мм), исполнением по степени защиты (IP44), климату однофазные асинхронные двигатели чешским исполнением (У3) и способом охлаждения (IC0141).

Сравнительный анализ обмоточных данных и геометрических размеров исследуемых ТАД [2] показывает, что:

– из-за меньших размеров лобовых частей обмотки и большей высоты зубцов максимальные электромагнитные нагрузки ( $B_\delta$ ,  $A_1$ ) у четырех- и шестиполюсных двигателей могут быть заметно большими, чем у двухполюсного;

1. Номинальные данные ТАД [2]

Параметр	4АА63А2У3	4АА63А4У3	4АА63А6У3
$n_0$ , об/мин	3000	1500	1000
$P_n$ , Вт	370	250	180
$s_n$ , %	8,3	8	11,5
$\eta_n$ , %	70	68	56
$\cos \varphi_n$	0,86	0,65	0,62
$K_3$	0,6	0,44	0,35
$n_n$ , об/мин	2750	1380	885
$M_n$ , Н·м	1,28	1,73	1,94
$k_{max}$	2,2	2,2	2,2
$k_n$	2,0	2,0	2,2
$k_i$	5,0	5,0	3,0

– из-за отличий конструкции и особенностей образования вращающегося магнитного поля двухполюсный двигатель, при прочих равных параметрах, имеет большие значения КПД и коэффициента мощности, чем четырех- и шестиполюсный.

Основное расчетное уравнение [5] для электрических машин имеет вид

$$\frac{D_1^2 \cdot l_1 \cdot n_0}{P_3} = \frac{6,1 \cdot 10^{12}}{k_B \cdot k_{об1} \cdot a_i \cdot B_\delta \cdot A_1}, \quad (1)$$

где:  $P_3$  – электромагнитная мощность в зазоре, кВт;  $n_0$  – частота вращения магнитного поля статора, об/мин;  $l_1$  – длина магнитного пакета статора, мм;  $D_1$  – внутренний диаметр статора, мм;  $B_\delta$  – Тл;  $A_1$  – А/м;  $k_B \approx 1,11$  – коэффициент формы кривой синусоидального поля в зазоре;  $k_{об1}$  – обмоточный коэффициент для основной гармоники ЭДС (для рассматриваемых машин, имеющих однослойные обмотки, принимается равным 0,96);  $a_i \approx 2/\pi$  – расчетный коэффициент полюсного перекрытия, равный отношению среднего значения магнитной индукции в зазоре  $B_{\delta\text{ср}}$  к ее максимальному значению  $B_\delta$ .

Основными размерами, характеризующими массогабаритные показатели двигателя, а, следовательно, и компрессора, являются внутренний диаметр статора  $D_1$  и длина сердечника статора  $l_1$ . Изменение диаметра сердечника приведет к изменениям в технологическом процессе штамповки и необходимости расчета новой геометрии пазов, что во многих случаях нецелесообразно по экономическим соображениям. Поэтому будем рассматривать возможности снижения массогабаритных показателей ТАД за счет изменения длины сердечника статора  $l_1$ . Перепишем уравнение (1) в следующем виде:

$$M_3 \approx \frac{P_3}{n_0} = \frac{k_B k_{об1} a_i l_1 B_\delta A_1 D_1^2}{6,1 \cdot 10^{12}}, \quad (2)$$

где  $M_3$  – электромагнитный момент двигателя.

Анализ выражения 2 и данных табл.1 позволяет утверждать о возможности снижения вращающего момента четырех- и шестиполюсного ТАД до значения  $M_H = 1,28$  Н·м двухполюсного ТАД за счет уменьшения длины сердечника статора  $l_1$ . При этом необходимо обеспечить неизменность электромагнитных нагрузок ( $B_\delta, A_1$ ).

Магнитная индукция в зазоре машины [5]:

$$B_\delta = \frac{\Phi}{\alpha_i \cdot \tau \cdot l_1 \cdot 10^{-6}}, \quad (3)$$

где:  $\Phi$  – основной магнитный поток статора, Вб;  $\tau = \pi D_1 / (2p)$  – полюсное деление, мм.

Магнитный поток машины определяется выражением

$$\Phi = \frac{E_1}{4k_B f_1 w_1 k_{об1}}, \quad (4)$$

где  $E_1$  – ЭДС статора, В;  $w_1$  – число последовательно соединенных витков обмотки фазы статора.

Анализируя выражения (3) и (4), можно увидеть, что для сохранения постоянства  $B_\delta$  достаточно пропорционально уменьшению длины статора  $l_1$  увеличить число витков обмотки статора  $w_1$ .

При переходе на повышенную частоту питающего напряжения при условии сохранения постоянства индукции в зазоре  $B_\delta$  (а следовательно, и момента двигателя) необходимо пропорционально уменьшить число витков фазы статора  $w_1$ .

Линейная нагрузка [5]:

$$A_1 = \frac{2m_1 w_1 I_1}{\pi D_1}, \quad (5)$$

где:  $m_1$  – число фаз статора;  $I_1$  – ток фазы статора, А.

Из основной Т-образной схемы замещения для одной фазы ТАД [5] можно записать:

$$I_1 = \frac{U_1}{Z}, \quad (6)$$

где  $Z$  – полное сопротивление фазы двигателя в Ом.

В общем случае  $Z$  нелинейно зависит от частоты  $f_1$ , числа витков фазы статора  $w_1$  и от длины статора  $l_1$ . Следовательно, ток двигателя  $I_1$  и его линейная нагрузка  $A_1$  также нелинейно зависят от этих величин. Однако в первом приближении можно считать, что зависимость  $A_1 = f(l_1, f_1, w_1)$  линейна аналогично электромагнитной нагрузке  $B_\delta = f(l_1, f_1, w_1)$ . Итак, можно считать, что величина  $A_1$  будет оставаться неизменной при уменьшении длины статора  $l_1$ , увеличении частоты  $f_1$

и пропорциональном изменении числа витков  $w_1$ .

Таким образом, из соотношения моментов исследуемых двигателей следует, что возможно снижение длины сердечника статора

для четырехполюсного ТАД ( $M_{н(4)} / M_{н(2)} = 1,34$ ) в 1,34 раза, что составляет  $l_{1(4)} = 56 / 1,34 = 42$  мм;

для шестиполюсного ТАД ( $M_{н(6)} / M_{н(2)} = 1,51$ ) в 1,51 раза, что составляет  $l_{1(6)} = 56 / 1,51 = 37$  мм.

При этом число витков фазы статора при уменьшении длины статора  $l_1$  и увеличении номинальной частоты  $f_1$ :

для четырехполюсного ТАД  $w'_{(4)} = 676 \cdot 1,34 / 2 = 452$  при  $f_1 = 100$  Гц;

для шестиполюсного ТАД  $w'_{(6)} = 1020 \cdot 1,51 / 3 = 513$  при  $f_1 = 150$  Гц.

Отметим также, что при изменении числа витков фазы статора необходимо изменить сечение проводников обмотки статора для сохранения неизменным коэффициента заполнения паза медью и повышения КПД. Новый диаметр провода можно определить по формуле

$$d' = d \sqrt{\frac{w_1}{w'_1}}, \quad (7)$$

и по каталогу выбрать ближайшее стандартное значение.

Рассчитаем энергетические и массогабаритные показатели укороченных ТАД. Основные магнитные потери (на гистерезис и вихревые токи) в асинхронном двигателе, определяются потерями в стали статора:

$$\Delta P_{cm1} = \Delta P_{c1} + \Delta P_{z1} \left( 1 + 20 \sqrt{t_1 \cdot (k_\delta - 1)^3} \right), \quad (8)$$

где  $\Delta P_{c1}$  и  $\Delta P_{z1}$  – соответственно, потери в спинке и зубцовом слое статора,  $t_1$  – зубцовое деление, м.

Потери в спинке и зубцовом слое статора определяются по формулам [1]:

$$\Delta P_{c1} = 1,6 p_{1,0/50} \left( f / f_n \right)^n B_c^2 m_{c1}, \quad (9)$$

$$\Delta P_{z1} = 1,8 \cdot p_{1,0/50} \cdot \left( f / f_n \right)^n B_z^2 \cdot m_{z1}, \quad (10)$$

где  $p_{1,0/50}$  и  $n$  – соответственно, удельные магнитные потери, Вт/кг, и показатель степени, зависящие от марки примененной стали (для стали марки 2013:  $p_{1,0/50} = 2,5$  Вт/кг и

$n = 1,5$ );  $m_{c1}$  и  $m_{z1}$  – соответственно, масса стали спинки и зубцового слоя, кг, определяемые из расчетного объема по формулам из [5].

Потери в стали ротора  $\Delta P_{cm2}$  крайне малы и могут быть рассчитаны так:

$$\Delta P_{cm2} = 0,1 \cdot \Delta P_{cm1}. \quad (11)$$

Масса меди обмоточного провода обмотки статора [5]

$$m_m = 8,9 z_1 n_{эл} q_{эл} (l_{cp} / 2) \cdot 10^{-6}. \quad (12)$$

где  $z_1$  – количество пазов статора;  $n_{эл}$  – число элементарных проводников в пазу;  $q_{эл}$  – площадь поперечного сечения элементарного проводника;  $l_{cp}$  – средняя длина катушки обмотки.

Электрические потери в меди статора определяются по выражению

$$\Delta P_{\sigma 1} = 3 I_1^2 R_{75^\circ C}, \quad (13)$$

а в обмотке ротора –

$$\Delta P_{\sigma 2} = (P_1 - \Delta P_{cm1} - \Delta P_{\sigma 1}) \cdot s, \quad (14)$$

где  $P_1 = 3 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi$  – активная мощность, потребляемая двигателем из сети.

Механические потери принимаем равными для всех вариантов:

$$\Delta P_{mex} = k_t \cdot (n_0 \cdot 10^{-3})^2 (D_{1н} \cdot 10^{-2})^4, \quad (15)$$

где  $k_t = 1,3(1 - D_{1н} \cdot 10^{-3})$  при  $2p = 2$  и  $k_t = 1$  при  $2p \geq 4$ .

Добавочные потери:

$$\Delta P_d = 0,005 \cdot P_1. \quad (16)$$

С использованием данных [5], описывающих геометрию пазов исследуемых ТАД, рассчитывались массы активных частей двигателя, входящие в (9) и (10), и соответствующие потери, а затем, с использованием среды моделирования Matlab 2008, рассчитывались энергетические показатели.

Основные результаты исследования сведены в таблицы 2 и 3.

Анализ результатов таблиц позволяет сделать следующие выводы:

1. Применение укороченных четырех- и шестиполюсных ТАД в герметичных компрессорах при питании их напряжением частотой соответственно, соответственно 100 и 150 Гц решением, так как при практически одинаковых значениях КПД высоко-частотные ТАД менее материалоемки.

## 2. Основные паспортные и расчетные номинальные параметры сравниваемых ТАД

Параметр	4AA63A2Y3	4AA63A4Y3, укороченный	4AA63A6Y3, укороченный
Номинальная частота источника питания $f_n$ , Гц	50	100	150
Номинальный момент $M_n$ , Н·м	1,28	1,28	1,28
Перегрузочная способность $k_m$	2,2	2,7	2,8
Номинальная частота вращения $n_n$ , об/мин	2750	2905	2914
Номинальная мощность $P_n$ , Вт	370	389	391
Номинальный ток фазы $I_{1n}$ , А	0,93	1,33	1,45

## 3. Конструктивные и энергетические параметры сравниваемых электроприводов ТХО

Параметр	4AA63A2Y3	4AA63A4Y3, укороченный	4AA63A6Y3, укороченный
Диаметр провода $d$ , мм	0,38	0,45	0,45
Длина рабочей части $l_1$ , мм	<b>56</b>	<b>42</b>	<b>37</b>
Добавочные потери $\Delta P_\delta$ , Вт	2,5	2,6	2,75
Суммарные потери $\Delta P_\Sigma$ , Вт	157	147	176
Номинальный КПД двигателя $\eta_n$ , %	<b>70</b>	<b>73</b>	<b>70</b>
Коэффициент мощности $\cos\varphi_n$	0,86	0,61	0,59
Номинальный КПД преобразователя $\eta_n$	-	0,95	0,95
Масса/объем кг/мм <sup>3</sup> :			
спинки	1,554/199300	0,785/100600	0,504/64580
зубцов	0,506/64930	0,496/63610	0,421/53970
статора	2,061/264200	1,281/164200	0,925/118600
ротора	0,884/113300	0,865/110800	0,872/111700
<b>Масса стали, кг</b>	<b>2,945</b>	<b>2,146</b>	<b>1,797</b>
<b>Масса меди, кг</b>	<b>0,504</b>	<b>0,464</b>	<b>0,451</b>

2. Укороченные четырехполюсные ТАД имеют более высокие энергетические характеристики, но при этом более высокую материалоемкость по сравнению с укороченными шестиполюсными. Эти различия с повышением мощности исследуемых ТАД уменьшаются.

3. При помощи математического моделирования установлено, что укороченные ТАД обладают более высокой перегрузочной способностью по сравнению с двухполюсным, что позволяет говорить о возможности дополнительного уменьшения длины их сердечника статора и еще большем снижении материалоемкости.

4. Приведенные значения коэффициентов мощности для укороченных двигателей получены в первом приближении и являются ориентировочными. Применение корректоров коэффициента мощности в преобразователях частоты [4, 9] позволит повысить  $\cos\varphi$  электропривода ТХО практически до единицы, следовательно, повысить его энергетический фактор.

5. Использование ПЧ удорожает ТХО в целом. Однако применение укороченных ТАД позволяет сэкономить до 10 % меди и 60-70 % стали на изготовление электропривода герметичного компрессора. Кроме того, частотное управление ТАД позволяет осуществлять плавный пуск двигателя компрес-

сора, поддерживать температуру в холодильной камере с необходимой точностью на заданном значении, улучшает виброакустические характеристики ТХО, способствует снижению потребления электроэнергии [3]. Для определения сроков окупаемости нового оборудования при использовании системы ПЧ-ТАД необходимы ее дальнейшие исследования.

#### Список использованной литературы

1. Алиев И.И. Асинхронные двигатели в трехфазном и однофазном режимах / Алиев И.И. – М.: – ИП Радио Софт, 2004. – 128 с.

2. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / Кравчик А.Э., Шлаф М.М., Афонин В.И., Соболенская Е.А. – М.: Энергоиздат, 1982. – 504 с.

3. Войтех В.А. Частотное регулирование скорости вращения асинхронных двигателей компрессоров бытовых холодильников / В.А. Войтех // Техн. электродинамика. Тематич. Вып. «Проблемы современной электротехники». – 2004. – Ч.3. – С. 61-62.

4. Карпович О.Я. Повышение энергетического фактора вентильно-индукторных электроприводов /О.Я. Карпович, О.А. Онищенко // Вестник НТУ “ХПИ”. – 2005. – № 45. – С. 400-404.

5. Кацман М.М. Расчет и конструирование электрических машин /Кацман М.М. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 360 с.

6. Лопухина Е.М. Автоматизированное проектирование электрических машин малой мощности /Лопухина Е.М., Семенчуков Г.А. – М.: Высш. шк., 2002. – 512 с.

7. Онищенко О.А. Оценка энергетических затрат на выработку холода бытовым холодильным прибором /О.А. Онищенко // Вісник КДПУ ім. М. Остроградського. – 2007. – № 3 (44). – Ч.1. – С. 106-110.

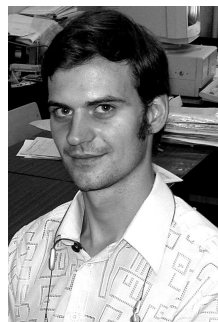
8. Онищенко О.А. Современный электропривод для систем холодильной техники / Живица В.И., Онищенко О.А., Радимов И.Н. и др. // Холодильная техника и технология. – 1999. – № 64. – С. 112-116.

9. Энергосбережение средствами промышленного электропривода. / А.Н. Закладной, А.В. Праховник, А.И. Соловей - К.: "ДИЯ", 2001. - 343 с.: ил.

Получено 20.09.2010



Онищенко  
Олег Анатольевич,  
канд. технич. наук, доцент  
каф. электротехники и  
электронных устройств  
Одесск. гос. акад. холода  
тел. (0482)-209-171,  
E-mail: olegoni@mail.ru



Букарос  
Андрей Юрьевич,  
ассистент каф. электро-  
техники и электронных  
устройств Одесск. гос.  
акад. холода  
тел. (0482)-209-171,  
E-mail: bucaros@mail.ru