

ОЦЕНКА РЕСУРСА СИСТЕМЫ ИЗОЛЯЦИИ УПРАВЛЯЕМОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ В ПОД СИНХРОННОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ РОТОРА

М.И. Коцур
Аспирант*

кафедра «Энергоснабжение промышленных предприятий»
контактный тел.: (061)769-84-11, 050-676-02-92
E-mail:kotsur_m@ukr.net

П.Д. Андриенко

Доктор технических наук, профессор, заместитель
председателя правления ОАО «НИИ Преобразователь»
ул. Кремлевская 63а, г. Запорожье, Украина, 69041
контактный тел.: (061)280-06-31

И.М. Коцур

Кандидат технических наук, доцент
кафедра «Электрические машины»
*Запорожский национальный технический университет
ул. Жуковского 64, г. Запорожье, Украина, 69063
контактный тел.: (061)769-84-11
E-mail:kotsur@zntu.edu.ua

Досліджується нагрівання асинхронного двигуна з фазним ротором у під синхронному діапазоні частоти обертання ротора при різних способах керування. Оцінюється тепловий ресурс системи ізоляції у тривалому (S1) та повторно-короткочасному (S3) режимах роботи

Ключові слова: нагрів, ізоляція, нагрівостійкість, модель, втрати

Исследуется нагрев асинхронного двигателя с фазным ротором в под синхронном диапазоне частоты вращения ротора при разных способах управления. Оценивается тепловой ресурс системы изоляции в продолжительном (S1) и повторно-кратковременном (S3) режимах работы

Ключевые слова: нагрев, изоляция, нагревостойкость, модель, потери

Thermal condition asynchronous motors with phase rotor in sub synchronous frequency rotation for different type of control drive system are investigated. The thermal resource of isolation system resource in short-time mode (S3) and continuous running duty (S1) are estimated

Key words: thermal condition, isolation, thermal resistance, model, losses

1. Введение

В настоящее время наряду с резисторным регулированием (РСУ) асинхронного двигателя (АД) с фазным ротором все чаще используются современные способы регулирования, с использованием полупроводниковых силовых элементов. Наиболее распространенными являются классическая схема импульсного регулирования в цепи выпрямленного тока ротора (ИРк), а также асинхронный вентильный каскад (АВК). Кроме этого, авторами была усовершенствована схема импульсного регулирования в цепи выпрямленного тока ротора со сбросом избыточной энергии ротора в сеть (ИРЭ). Применение данных схем, обеспечивает плавное изменение скорости в под синхронном диапазоне, сопровождающееся постоянной коммутацией силовых элементов. Это приводит к росту гармонического состава токов статора и ротора, а следовательно к увеличению добавочных потерь. Кроме этого, при регулировании в под синхронном диапазоне ухудша-

ются условия охлаждения АД, а, следовательно, увеличивается термические нагрузки АД, что приводит к снижению эксплуатационной надежности изоляции АД. Следовательно, определение ресурса системы изоляции с целью повышения эксплуатационной надежности управляемого АД является актуальной задачей.

2. Анализ последних предшествующих исследований и публикаций.

Анализ научных работ показал, что в многочисленных работах отечественных и зарубежных авторов тепловое состояние АД исследовано в основном при частотном управлении АД с короткозамкнутым ротором [3]. Тогда как, тепловое состояние АД с фазным ротором при управлении РСУ, ИР и АВК, а также термическая стойкость его системы изоляции изучены недостаточно.

3. Постановка задачи

Целью данной работы было исследование теплового состояния АД с фазным ротором, а также ресурса системы изоляции при исследуемых способах управления для режимов работы S1 и S3.

4. Изложение основного материала

На примере АД с фазным ротором, в частности для МТФ-111-6, согласно [6], разработана ЭТС, подробно описывающая строение пазовой и лобовой зон обмоток статора и ротора и учитывающая особенности конструкции АД (рисунок 1). Согласно данной ЭТС, методом узловых потенциалов составлена система дифференциальных уравнений первого порядка, которая в матричной форме для нестационарных режимов работы записывается следующим образом:

$$\left[\frac{d\Theta}{dt} \right] \times [c] + [\lambda] \times [\Theta] = [p] \quad (1)$$

где $[\Theta]$ - матрица-столбец превышений температур узлов; $\left[\frac{d\Theta}{dt} \right]$ - матрица-столбец первых произво-

дных по времени превышений температур узлов; $[\lambda]$ - матрица связи тепловых проводимостей, зависящих от параметров ЭТС; $[p]$ - матрица-столбец тепловых потерь; $[c]$ - матрица теплоёмкостей узлов.

Приведенная на рис. 1 ЭТС для МТФ-111-6 содержит следующие узлы: 1 – провод обмотки статора (по длине паза); 2 – изоляция провода обмотки статора (по длине паза); 3,4 – часть изоляции пазовой коробки статора, расположенная на дне паза (первый слой, второй слой соответственно); 5,6 – торцевая часть изоляции пазовой коробки статора; 7,8 – верхняя часть изоляции пазовой коробки статора; 9 – подклиник паза статора; 10 – клин паза статора; 11 – зубцовая зона сердечника статора; 12 – зона спинки сердечника статора; 35 – провод обмотки ротора (по длине паза) (нижний слой); 13 – изоляция провода обмотки ротора (по длине паза) (верхний слой); 14,15 – торцевая часть нижнего слоя пазовой коробки ротора; 16,17 – часть изоляции пазовой коробки ротора расположенная на дне паза; 18 – зона спинки сердечника ротора; 19 – зубцовая зона сердечника ротора; 21,22 – межслойная изоляция; 23 – провод обмотки

ротора на длину паза ротора (верхний слой); 24 – изоляция провода обмотки ротора на длину паза, расположенного в верхнем слое; 25,26 – верхняя торцевая часть пазовой коробки паза ротора; 27,28 – верхняя часть пазовой коробки ротора; 29 – подклиник паза ротора; 30 – клин паза ротора; 31 – провод лобовой части обмотки статора; 32 – изоляция провода лобовой части обмотки статора; 33,34 – межфазная изоляция лобовой части обмотки статора; 36,40 – провод нижнего и верхнего слоев лобовой части обмотки ротора; 37,41 – изоляция провода нижнего и верхнего слоев лобовой части обмотки ротора; 38,39,42, 43 – межфазная изоляция провода нижнего и верхнего слоя лобовой части обмотки статора и ротора; 44 – внутренний воздух; 45 – станина двигателя.

При определении тепловых проводимостей элементов ЭТС учитывалось изменение скорости турбулентного течения воздуха внутри АД, вызванное изменением частоты вращения ротора, путем пересчета условий теплосъема [4,5]. На рис. 1 эти тепловые проводимости обозначены как переменные.

При составлении тепловой модели учитывались теплофизические свойства изоляции, а именно, коэффициенты удельной теплопроводности и теплоемкости, соответствующие заданному типу изоляции, которые применяются заводом изготовителем для МТФ-111-6: марка провода-ПЭТ-155; пазовая коробка, межслойная (для ротора) и межфазная изоляция – стеклослюдопласт ГИК-Т-ЛСП ($s=0,15\text{мм}$), стеклослюдокань – ЛСП130-155 ($s=0,25\text{мм}$); подклиник – стеклослюдопласт - ГИК-Т-ЛСП ($s=0,25\text{мм}$), клин – профильный стеклослюдокань СПП-ЭП (3х6 мм.).

Тепловое состояние АД определяется интенсивностью тепловыделения в узлах АД и зависит от величины полных потерь (основных и дополнительных от высших гармонических тока). Дополнительные магнитные потери не превышают 5 % от основных магнитных потерь и не оказывают существенного влияния на температуру железа статора и ротора. Однако, согласно [2] с ростом частоты тока ротора основные магнитные потери в железе ротора увеличиваются, поэтому при оценке теплового состояния АД в под синхронном диапазоне частоты вращения ротора их обязательно необходимо учитывать.

Электрические потери при несинусоидальной форме тока определяются из следующего выражения:

$$P_{эл} = 3 \cdot I_{cp}^2 R, \quad (2)$$

где

$$I_{cp} = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} \left(I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} I_{km} \sin(k\omega t + \psi_k) \right) dt \quad (3)$$

На рис. 2 показаны зависимости электрических потерь в обмотках статора и ротора МТФ-111-6 ($P_n=3,5\text{кВт}$) от скольжения при управлении АВК (кривая 1), ИР(к) (кривая 2) и ИР(э) (кривая 3). С увеличением скольжения электрические потери растут из-за увеличения содержания гармонического состава тока: для АВК и ИР в 1,24 раза, для ИР(э) в 1,2 раза. Характер изменения электрических потерь в обмотке ротора для рассматриваемых способов управления идентичен. При этом, при скольжении $s=0,9$ значение потерь для АВК увеличивается в 1,35 раза, ИР(к) в 1,32 раза для ИР(э) в 1,25 раза относительно номинального значения потерь в обмотке ротора.

Анализ теплового состояния АД показал, что наиболее нагреваемым элементом АД является лобовая часть обмотки статора. Для него на рис. 3 показаны превышения температур в виде функции $\Theta_{max}^* = f(s)$

соответственно для лобовых частей обмоток статора и ротора при разных способах управления для режима S3($P_B=0,4$). Характер кривых $\Theta_{max}^* = f(s)$ для ИР(к),

ИР(э) и АВК полностью отражает характер изменения

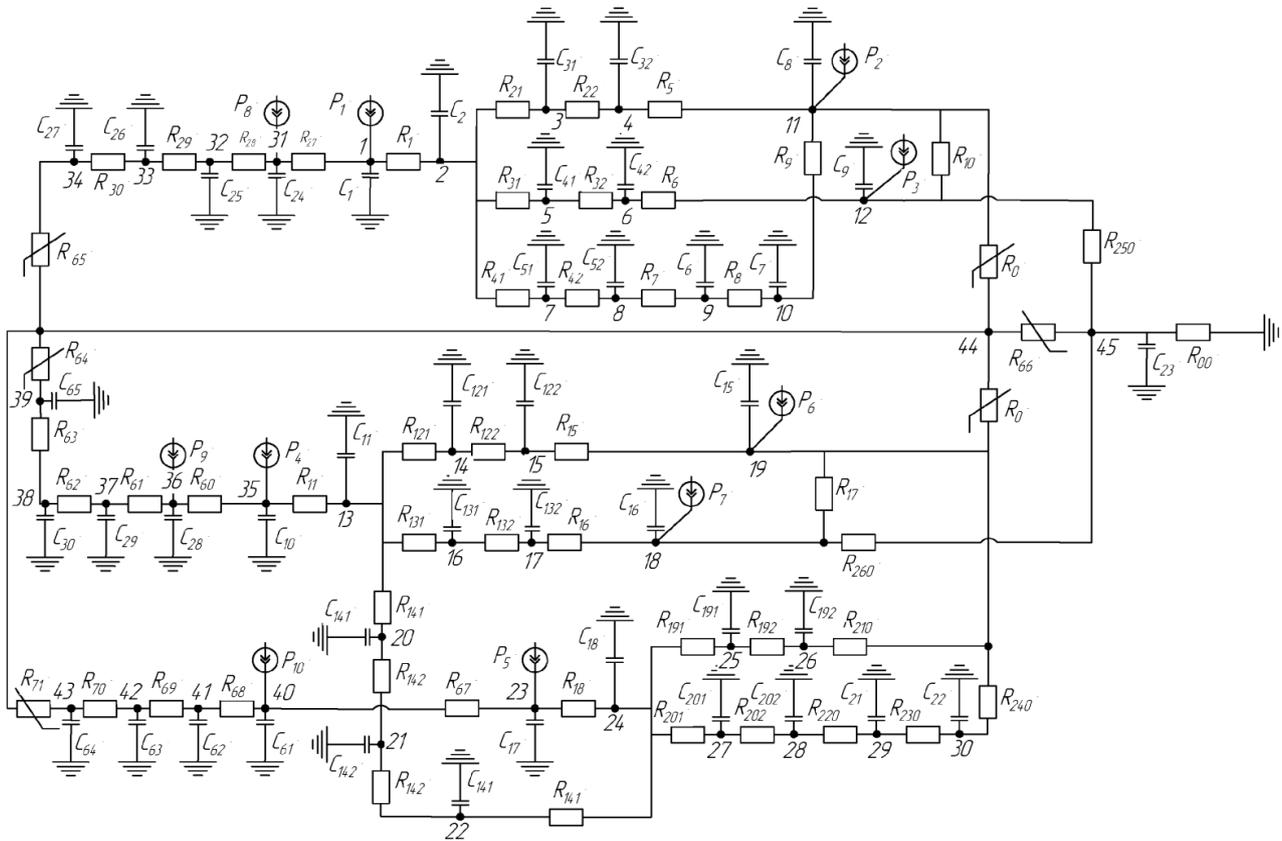


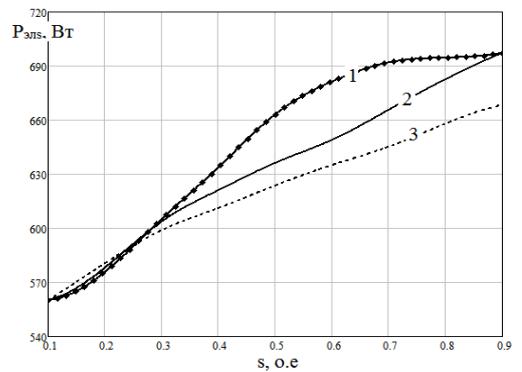
Рис. 1. Эквивалентная тепловая схема замещения АД

электрических потерь при данных способах управления при соответствующих значениях рабочего скольжения. Увеличение Θ_{\max}^* при РСУ с ростом ра

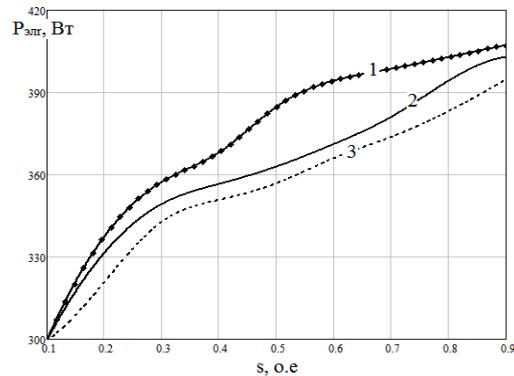
бочего скольжения вызван ухудшением условий охлаждения внутренним воздухом АД.

Благодаря тому, что тепловая модель АД учитывает многокомпонентность системы изоляции, был выполнен анализ распределения температур по пазу статора и ротора, который показал, что средний перепад температур между источником тепловыделением и изоляцией пазовой коробки статора составляет: для первого и второго слоя соответственно $-2,5^{\circ}\text{C}$ и $4,5^{\circ}\text{C}$ и $1,2^{\circ}\text{C}$ и $2,6^{\circ}\text{C}$ для пазовой коробки ротора; для подклиника – $6,7^{\circ}\text{C}$ (статор) и $4,1^{\circ}\text{C}$ (ротор); для клина – $11,4^{\circ}\text{C}$ (статор) и $7,2^{\circ}\text{C}$ (ротор); для межфазной изоляции – 1°C (1 слой) и $1,3^{\circ}\text{C}$ (2 слой) для обмотки статора; $0,5^{\circ}\text{C}$ (1 слой) и $0,8^{\circ}\text{C}$ (2 слой) для обмотки ротора. Величина перепада температур при разных способах управления не меняется, однако уменьшается с ростом рабочего скольжения АД.

Учитывая локальные перепады температур между элементами системы изоляции статора и ротора АД по методике [1] оценивался ресурс изоляции. На рис. 4,5 приведены зависимости теплового ресурса в виде функции $T^*=f(s)$ соответственно для элементов системы изоляции статора и ротора от значения скольжения в продолжительном режиме работы АД.



а)



б)

Рис. 2. Электрические потери в статора (а), ротора (б) в функции от скольжения для режима S3 ПВ=0,4 при управлении: 1 – АВК; 2 – ИР(κ); 3 – ИР(э).

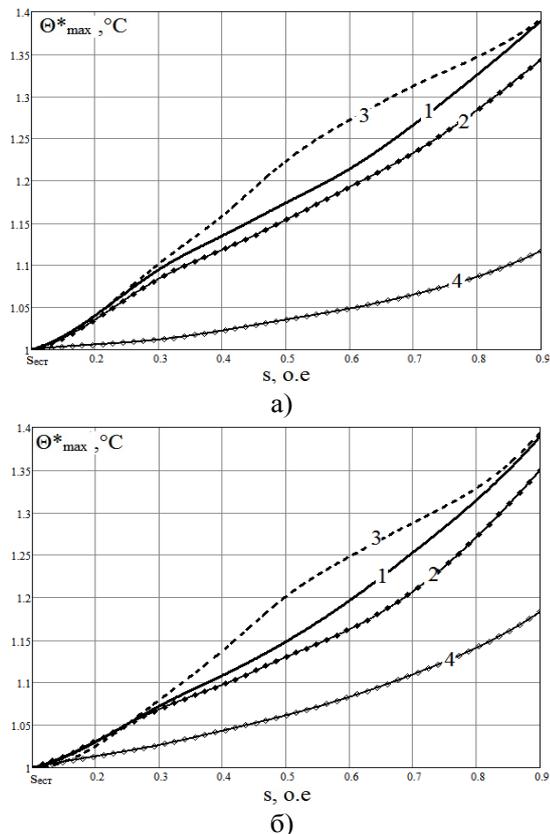


Рис. 3. Превышение максимальной температуры лобовой части обмотки статора при ИР(к) с $f_k=3000\text{Гц}$ (кривая 1), ИР(э) с $f_k=3000\text{Гц}$ (кривая 2), АВК (кривая 3), РСУ (кривая 4) для режима S3 (ПВ=0,4).

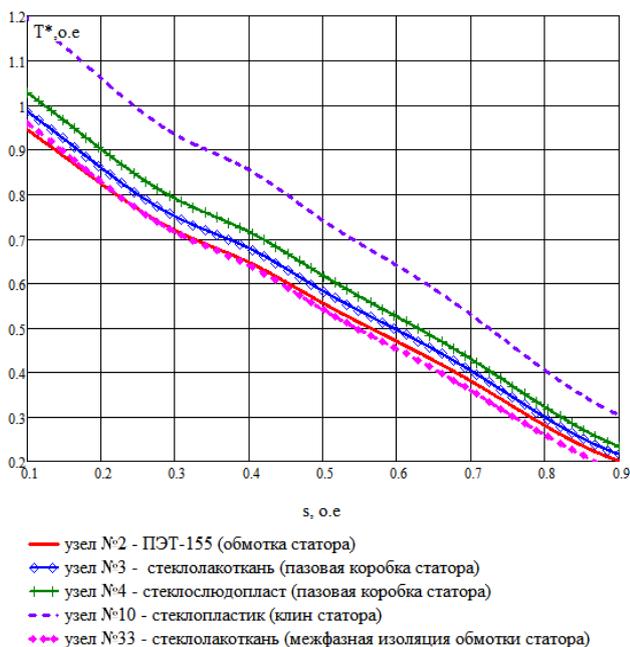


Рис. 4. Тепловой ресурс элементов системы изоляции статора в виде функции $T^*=f(s)$ для режима работы S1.

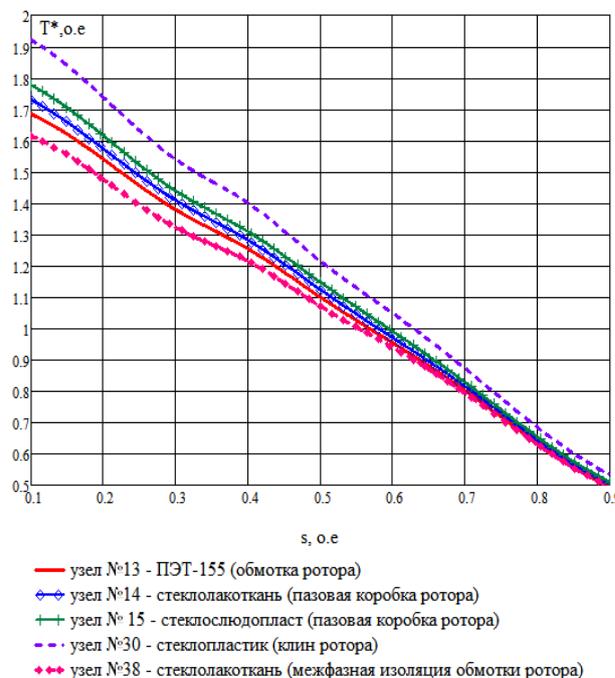


Рис. 5. Тепловой ресурс элементов системы изоляции ротора в виде функции $T^*=f(s)$ для режима работы S1.

Перепад температур между отдельными частями пазовой коробки статора и ротора не превышает $0,3^{\circ}\text{C}$, поэтому тепловой ресурс рассматривается для этого элемента в целом. В табл. 1 представлены значения ресурса элементов изоляции: пропиточного состава провода обмоток статора и ротора (узлы 2,13), изоляции пазовой коробки (узлы 3,14), клина (узлы 10,30), межслойной изоляции (узлы 32,37). Расчеты выполнены для продолжительного режима S1 и повторно-кратковременного S3 ПВ=0,6; 0,4 при среднем значении частоты вращения ротора $s=0,5$ и при ползучей скорости $s=0,9$. Для режимов работы S3 ПВ=0,25 и S3 ПВ=0,15 ресурс изоляции $T^*>1,5$, поэтому здесь не приводится. При значении ресурса $T^*<1$ эксплуатационной надежности АД снижается.

В работе [1] для повышения эксплуатационной надежности изоляции было предложено ограничить установочную мощность на валу АД с целью поддержания ресурса на уровне $T^*=1$. Однако, на практике это ограничение не всегда можно реализовать из-за нормированных технологических и производственных процессов. Увеличение ресурса изоляции можно достичь, применяя новые виды изоляционных материалов с повышенным классом нагревостойкости.

С этой целью, для статора и ротора предложена изоляция типа синтофлекс 818Н на основе арамидной бумаги Номекс 410. В табл. 2 представлены расчетные значения ресурса для предложенной изоляции. При этом, эксплуатационная надежность изоляции существенно повышается.

Таблица 1

Ресурс изоляции для класса нагревостойкости F

Режим	Элемент изоляции	Тепловой ресурс изоляции, T* _{о.е}								
		PCY		ИР(к)		ИР(э)		АВК		
		s=0,5	s=0,9	s=0,5	s=0,9	s=0,5	s=0,9	s=0,5	s=0,9	
S1	статор	2	0,74	0,43	0,53	0,2	0,57	0,21	0,43	0,2
		3	0,77	0,45	0,56	0,22	0,61	0,22	0,46	0,21
		10	0,96	0,6	0,72	0,31	0,77	0,32	0,6	0,3
	ротор	33	0,72	0,39	0,52	0,18	0,56	0,19	0,42	0,17
		13	1,33	0,77	1,09	0,51	1,15	0,52	0,93	0,5
		14	1,35	0,79	1,17	0,53	1,17	0,53	0,95	0,5
30		1,47	0,8	1,21	0,55	1,27	0,56	1,03	0,53	
38		1,31	0,78	1,06	0,51	1,11	0,51	0,91	0,49	
2		1,22	0,86	0,89	0,4	1,05	0,52	0,73	0,4	
S3, ПВ=0,6	статор	3	1,42	1,0	1,04	0,48	1,10	0,55	0,85	0,47
		10	1,77	1,29	1,33	0,66	1,25	0,65	1,11	0,65
		33	1,28	0,85	0,92	0,39	0,98	0,46	0,75	0,38
	ротор	13	2,03	1,36	1,59	0,82	1,65	0,9	1,37	0,81
		14	2,08	1,39	1,62	0,84	1,69	0,92	1,4	0,82
		30	2,27	1,5	1,78	0,91	1,86	1,0	1,54	0,9
38		1,98	1,34	1,55	0,8	1,6	0,88	1,33	0,79	
2		2,12	1,75	1,33	0,71	1,42	0,82	1,12	0,7	
3		2,22	1,84	1,4	0,76	1,5	0,87	1,18	0,75	
S3, ПВ=0,4	статор	10	2,75	2,32	1,79	1,03	1,91	1,17	1,54	1,01
		33	1,97	1,58	1,21	0,62	1,31	0,72	1,02	0,61
		13	2,65	2,03	1,73	0,89	1,84	1,0	1,45	0,86
	ротор	14	2,7	2,08	1,77	0,91	1,89	1,02	1,49	0,89
		30	2,99	2,28	1,99	1,04	2,11	1,15	1,68	1,02
		38	2,58	1,98	1,67	0,85	1,78	0,95	1,4	0,83

Таблица 2

Ресурс изоляции для класса нагревостойкости H

Режим	Элемент изоляции	Тепловой ресурс изоляции, T* _{о.е}								
		PCY		ИР(к)		ИР(э)		АВК		
		s=0,5	s=0,9	s=0,5	s=0,9	s=0,5	s=0,9	s=0,5	s=0,9	
S1	статор	2	2,5	1,53	1,86	0,77	2,0	0,8	1,54	0,76
		3	2,61	1,62	1,95	0,83	2,1	0,85	1,62	0,81
		10	3,18	2,07	2,45	1,14	2,6	1,16	2,06	1,11
	ротор	33	2,46	1,4	1,82	0,67	1,96	0,71	1,5	0,68
		13	4,27	2,61	3,55	1,78	3,72	1,81	3,09	1,74
		14	4,33	2,65	3,61	1,8	3,8	1,83	3,15	1,77
30		4,65	2,78	3,9	1,91	4,08	1,93	3,4	1,87	
38		4,19	2,63	3,46	1,78	3,63	1,8	3,02	1,74	
2		3,94	2,83	3,95	1,45	3,13	1,65	2,47	1,43	
S3, ПВ=0,6	статор	3	4,52	3,29	3,4	1,7	3,6	1,93	2,85	1,67
		10	5,52	4,15	4,25	2,27	4,48	2,55	3,02	1,78
		33	4,11	2,83	3,05	1,42	3,24	1,61	3,61	2,23
	ротор	13	6,25	4,35	5,0	2,75	5,19	2,99	4,38	2,72
		14	6,37	4,43	5,1	2,81	5,3	3,65	4,46	2,77
		30	6,91	4,74	5,55	3,05	5,76	3,3	4,88	3,0
38		6,1	4,29	4,8	2,69	5,05	2,93	4,25	2,65	
2		-	-	4,25	2,4	4,52	2,77	3,65	2,39	
3		-	-	4,46	2,5	4,74	2,92	3,83	2,34	
S3, ПВ=0,4	статор	10	-	-	5,58	3,37	5,9	3,81	4,86	3,33
		33	-	-	3,92	2,13	4,19	2,46	3,35	2,11
		13	-	-	5,4	2,96	5,71	3,27	4,61	2,89
	ротор	14	-	-	5,52	3,03	5,85	3,35	4,72	2,97
		30	-	-	6,14	3,4	6,46	3,74	5,27	3,33
		38	-	-	5,24	2,85	5,55	3,15	4,46	2,78

В табл. 3 представлены рекомендации по применению системы изоляции статора и ротора управления PCY, ИР и АВК для двух регулировочных зон. Данные рекомендации позволят повысить эксплуатационную надежность АД за счет комбинирования элементов системы изоляции с разными классами нагревостойкости.

Рекомендации по применению системы изоляции

Режим	Система изоляции	Класс нагревостойкости изоляции							
		sect≤s<0,5				0,5≤s>0,9			
		PCY	ИР(к)	ИР(э)	АВК	PCY	ИР(к)	ИР(э)	АВК
S1	статор	H	H	H	H	H	H	H	H
	ротор	F	F	F	H	H	H	H	H
S3	статор	F	F	F	H	H	H	H	H
ПВ=0,6	ротор	F	F	F	F	F	H	H	H
S3	статор	F	F	F	F	F	H	H	H
ПВ=0,4	ротор	F	F	F	F	F	H	F	H

5. Выводы

1. Разработана тепловая модель АД с фазным ротором с детальной дискретизацией системы изоляции, позволяющая рассчитывать локальный нагрев элементов системы изоляции статора и ротора.

2. Выполнена оценка ресурса системы изоляции АД с фазным ротором при разных способах управления для двух регулировочных зон.

3. Предложены рекомендации по применению комбинированных систем изоляции статора и ротора с разным классом нагревостойкости при разных способах управления АД с фазным ротором. Это позволит оптимально использовать АД в продолжительном S1 и повторно-кратковременных режимах работы S3 ПВ=0,6; ПВ=0,4. Для режимов работы S3 ПВ=0,25; ПВ=0,15 при регулировании АД в подсинхронном диапазоне частоты вращения ротора достаточно использовать изоляцию класса нагревостойкости F.

Литература

1. Андриенко П.Д. Анализ термической стойкости изоляции асинхронного двигателя с фазным ротором при разных способах управления [Текст] / П.Д. Андриенко, И.М. Коцур, М.И. Коцур// "Електротехнічні та комп'ютерні системи".- К.:Техніка, 2011, №3(79).- С. 420-422.

2. Копылов И.П. Проектирование электрических машин: учеб. для вузов.— В 2-х кн.: кн. 1[Текст] / И.П. Копылов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкин, и др.; под общ. ред. И.П. Копылова -М.: Энергоатомиздат, 1993.-464 с.

3. Петрушин В.С., Рябинин С.В., Якимец А.М. Анализ потерь и теплового состояния асинхронного двигателя при частотном управлении [Текст]

- /В.С. Петрушин, С.В. Рябинин, А.М. Якимец//Праці Ін-ту електродинаміки НАН України. – Київ: ІЕД НАН України,1999. – Вип.1. – С. 31 – 36.
4. Сипайлов Г.А. Тепловые гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах [Текст] / Г.А. Сипайлов, Д.И. Санников, В.А. Жадан - М.: Высш. Шк., 1989. - 240 с.
5. Счастливый Г.Г. Нагревание закрытых асинхронных электродвигателей [Текст] / Г.Г. Счастливый; К.: Наукова думка, 1966. – 196с.
6. Федоров М.М. Моделирование теплового состояния узлов электрических машин в различных режимах [Текст] / М.М. Федоров // 36. наук. праць ДонДТУ. Сер. «Проблеми моделювання та автоматизації проектування динамічних систем». - Донецьк: ДонДТУ, 1999. - Вип. 10. - С. 90-95

УДК 678.027.3-036.5

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОХОЛОДЖЕННЯ ГОФРОВАНИХ ПОЛІМЕРНИХ ТРУБ

В.Т. Вознюк

Аспірант*

Контактний телефон: (+38050) 075-44-30; (+38044) 406-84-00

e-mail: voznyuk.slava@gmail.com

Ю.О. Кравченко

Магістр*

Контактний телефон: (+38093) 044-52-56

e-mail: uk5@yandex.ru

І.О. Мікульонюк

Доктор технічних наук, професор

*Кафедра машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

Проспект Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна

Контактний телефон: (+38066) 748-65-65; (+38044) 406-84-40

e-mail: i.mikulionok@kpi.ua

Досліджено дискретну (з чергуванням по довжині водяних і повітряних ділянок) систему охолодження двошарових гофрованих полімерних труб. Оцінено ефективність різних схем дискретної і неперервної систем охолодження

Ключові слова: гофрована полімерна труба, охолодження, дискретна система, ефективність

Исследована дискретная (с чередованием по длине водяных и воздушных участков) система охлаждения двухслойных гофрированных полимерных труб. Оценена эффективность разных схем дискретной и непрерывной систем охлаждения

Ключевые слова: гофрированная полимерная труба, охлаждение, дискретная система, эффективность

There is researched discrete cooling system (with alternation along length water and air divisions) of corrugated plastic pipe. There is estimated different scheme of discrete and uninterrupted cooling systems working

Key words: corrugated plastic pipe, cooling, discrete system, efficiency

1. Вступ

Виготовлення двошарових гофрованих полімерних труб екструзією є достатньо енерго- і ресурсоємним процесом [1]. Оскільки низька теплопровідність матеріалу і конструкція труби не дають змоги швидко здійснювати відведення теплоти з зовнішньої поверхні екструдованої труби, то під час цього процесу не можливо уникнути значних витрат енергії на циркуляцію в системі охолодження води та її охолодження в холодильнику. Отже, охолодження є обмеженою стадією виготовлення полімерних труб, при цьому довжина зони охолодження може сягати декількох десятків метрів [2]. Крім того, під час охолодження зрошенням на ділянці довжиною один метр витрата води може

становити декілька кубічних метрів за годину [3], тому на охолодження труби в цілому витрата охолодної води може сягати 100 м³/год.

Метою праці є підвищення ефективності охолодження екструдованих багатошарових гофрованих полімерних труб, що дасть змогу зменшити енерго- і ресурсоємність процесу їх виготовлення.

2. Типова система охолодження гофрованих полімерних труб

Формування гофрованої труби і попереднє охолодження трубної заготовки до температури, за якої властивості полімеру забезпечують фіксацію форми