



Ю.А. Зеленецкий, начальник научно-технического центра ОАО «Завод «Микропровод»;
А.С. Кобелев, канд. техн. наук, начальник расчетного-теоретического отдела
ПАО «Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический
институт электромашиностроения»

Повышение энергоэффективности асинхронных электродвигателей путем применения эмалированных проводов, изготовленных по современной технологии

Аннотация. В статье обсуждается возможность повышения энергоэффективности асинхронных двигателей путем снижения потерь в обмотках статора за счет применения современных конструкций эмалированного провода с уменьшенной толщиной изоляционного покрытия. Показано, что для большинства областей применения величина пробивного напряжения изоляции является избыточной. Снижение уровня пробивного напряжения до допустимого значения за счет уменьшения толщины изоляционного покрытия позволяет увеличить объем чистой меди в пазу и перейти к более высокому классу энергоэффективности электродвигателя с минимальными дополнительными затратами. Предложено изменение методики проектирования асинхронных электродвигателей, суть которого заключается в том, что оптимальная толщина электроизоляционного покрытия провода подбирается персонально для каждого проектируемого типоразмера двигателя с учетом допустимых показателей по надежности.

Ключевые слова: энергоэффективность, асинхронные электродвигатели, эмалированные провода.

Abstract. The paper discusses potential improvement of energy efficiency of induction motors by way of reducing losses in the stator winding due to the use of advanced enameled wire constructions with reduced insulation layer thickness. It is shown that for most applications the insulation breakdown voltage value is redundant. Decrease of the breakdown voltage down to the admissible threshold due to the reduction of the insulation coating thickness allows to increase the volume of pure copper in the groove and therefore to switch over to producing electric motors of a higher energy efficiency class with minimal additional expenditure. Amendment to the induction motor design technique is offered. The main point of this amendment is the following: optimal thickness of enameled wire insulation coating should be selected individually for each designed motor dimension-type with allowable reliability tolerances taken into account.

Key words: energy efficiency; induction motors; enameled wires.

Материал поступил в редакцию 13.07.2015 г.
Зеленецкий Ю.А. E-mail: zelenezky@mikroprovod.ru
Кобелев А.С. E-mail: a.kobelev@ruselprom.ru

Введение

Истоками движения за высокие показатели энергоэффективности современных асинхронных электродвигателей (АЭД) являются общеизвестные экологические проблемы и истощение медленно возобновляющихся энергетических ресурсов.

Согласно международному стандарту IEC 60034-30-1, регламентирующему классы энергоэффективности асинхронных электродвигателей, диапазон габаритов (высот вращения), подпадающий под стандарт, составляет 63–450 мм.

Данный диапазон можно разделить на три группы:

– малые АЭД габаритов 63–112 мм, так называемые «медные»*, в которых доминирующими являются потери P_{cu} в обмотках статора; далее по значимости в малых АЭД идут потери P_{al} в клетке ротора; доля потерь P_{fe} в магнитопроводе статора незначительна;

– средние габариты 132–225 мм, так называемые «медно-железные», в которых потери P_{cu} продолжают превалировать, но уменьшаются в абсолютном выражении; при этом значимость P_{fe} возрастает;

– старшие габариты 250–450 мм, в которых начинают превалировать потери в магнитопроводе P_{fe} .

Разумеется, для двухполюсных машин всех габаритов с системой охлаждения IC 411 велика значимость механических потерь P_{mec} ; при $2p = 4$ механические потери имеют меньший удельный вес. При $2p > 4$ P_{mec} малы.

В настоящей работе в качестве типопредставителей рассматриваются четырехполюсные АЭД. Для расчетных примеров отобраны габариты 80, 132, 180, 315 мм (табл. 1).

Отечественные серии электродвигателей 4А, АИР, 5А проектировались таким образом, что в «медных машинах» $P_{cu} > 50\% \Delta P_{\Sigma}$; в «медно-железных машинах» $P_{cu} = (50-30)\% \Delta P_{\Sigma}$; в «железных машинах» $P_{cu} < 30\% \Delta P_{\Sigma}$ (табл. 1, поз. 1, 4, 7, 10). Здесь ΔP_{Σ} – суммарные потери в АЭД. Понятия «медные машины», «медно-железные машины» и «железные машины» применяются в электромашиностроении на основе соотношения активных потерь в меди и магнитных потерь в стали.

В настоящем исследовании нас интересует возможность повышения энергоэффективности АЭД путем снижения потерь P_{cu} , определяемых активным сопротивлением

* Такую терминологию можно найти в [1].

обмоточного провода. Для этого рассмотрим возможности, предоставляемые современными конструкциями эмалированного провода.

Преимущества современной технологии производства эмалированных проводов

Основные конструкции эмалированных проводов были разработаны в 70–80-е годы прошлого века. Соответственно в методиках расчета электрических машин учитывались параметры, заложенные в конструкторской документации на эмалированные провода, а также изменение параметров эмальпровода в процессе изготовления электрической машины. Данные рекомендации используются и сегодня для выбора эмалированного провода при проектировании электродвигателей (табл. 2.6 в [2]).

Современная технология совмещает процессы волочения и эмалирования и обеспечивает более высокий уровень параметров эмалированных проводов, что следует учитывать при проектировании новых АЭД. Положительный эффект современной технологии производства эмалированных проводов достигается за счет действия целого ряда факторов. Данная статья не ставит целью раскрытие этих факторов, но использует их для аргументации.

Основными эксплуатационными характеристиками эмалированных проводов являются геометрические размеры токопроводящей жилы и электроизоляционного покрытия, а также электрическое напряжение, которое выдерживает изоляция в течение длительного срока эксплуатации электромеханического устройства. Данный параметр в конструкторской документации задан и подтверждается испытанием по проверке пробивного напряжения Unp . Величина Unp в свою очередь зависит от толщины электроизоляционного покрытия. В конструкторской документации на эмалированные провода указано достаточно большое поле допуска на диаметр изолированного провода. Так, например, для провода марки ПЭТ-155 диаметром 1,00 мм минимальная толщина изоляционного покрытия составляет 50 мкм, максимальная – 95 мкм. Такой разброс нормированной толщины покрытия представлял собой компромисс между требованиями заказчика и возможностями технологии производства эмалированных проводов. Фактический разброс для диаметра 1,0 мм не превышает 20 мкм.

За прошедшие годы произошли значительные изменения в технологии производства эмалированных проводов, что привело к улучшению эксплуатационных характеристик, а также к значительному повышению их стабильности. Улучшение параметров

Таблица 1

Сводная таблица расчетных данных отобранных типоразмеров АЭД

№ поз.	Типоразмер	Pn кВт	Сталь		η %	P _{cu} Вт	P _{cu..} %	P _{al} Вт	P _{fe} Вт	P _{mec} Вт	Θ _{cu} °	Kпаз	Gcu кг	Cact о.е.	Данные обмотки	
			–	мм											d _{из} × Sn	(dиз)
1	5A80MB4	1,5	2212	96	75,4	281	57,4	м107	55	23	73,9	0,667	1,25	2,9	0,71 × 49	(0,78)
2	BAE80B4ie2-		2412	130	82,2	158	32,3	92	39	13	46,9	0,78	1,86	4,37	0,85 × 43	(0,923)
3	BAE80B4ie2		2212	130	82,9	126	40,7	80	70	13	40,2	0,8	2,03	4,19	0,9 × 42	(0,945)
4	AIPM132M4	11	2212	160	87,7	580	37,6	289	251	132	77	0,683	7,34	15,1	(2 × 1,12) × 33	(1,2)
5	7AVER132M4ie2 v1		2412	200	89,9	395	32	330	261	73	54,5	0,767	8,36	17,9	(3 × 1,0) × 30	(1,08)
6	7AVER132M4ie2 v2		2212	180	89,9	402	32,5	315	267	72	57,5	0,759	9,1	17,9	(2 × 1,27) × 31	(1,32)
7	AIP180M4	30	2212	200	90,6	1320	42,4	681	480	268	91,6	0,735	16,15	33,14	(3 × 1,12 + 3 × 1,18) × 17	(1,2; 1,26)
8	7AVER180M4ie2 v1		2412	245	92,3	1071	42,8	595	363	171	77,7	0,777	14,21	37,3	(3 × 1,12 + 3 × 1,06) × 16	(1,2; 1,14)
9	7AVER180M4ie2 v2		2212	245	92,3	857	34,2	567	606	171	69,8	0,81	15,87	35,57	(3 × 1,63) × 16	(1,69)
10	5AM315M4e	200	2212	390	95,4	2633	27,3	1937	2191	1653	92,1	0,753	123,6	233,3	(9 × 1,6) × 16	(1,69)
11	7AVER315M4ie2		2212	390	95,5	2487	26,4	1848	2097	1652	69,3	0,749	105	211,1	(4 × 1,6 + 5 × 1,5) × 12	(1,69; 1,59)
12	7AVER315M4ie3		2412	390	96,0	2296	27,5	1612	1413	1652	62,7	0,787	109,9	235,6	(10 × 1,5) × 12	(1,59)
13	7AVER315M4ie3-		2212	390	95,7	2020	22,5	1819	2097	1652	62,9	0,865	117,5	235	(11 × 1,53) × 12	(1,59)

– L_s – активная длина сердечника статора, мм; – P_{al} – потери в клетке ротора, Вт;
 – η – КПД асинхронного двигателя, %; – P_{fe} – потери в магнитопроводе статора, Вт;
 – P_{cu} – потери в обмотках статора, Вт; – P_{mec} – механические потери, Вт;
 – P_{cu..} – потери в обмотках статора, в % от общих потерь; – Θ_{cu} – превышение температуры обмотки статора над окружающей средой, °C

Данные обмотки:
 – d_ж × Sn – диаметр токопроводящей жилы, мм, умноженный на число эффективных проводников. Запись (4 × 1,6 + 5 × 1,5) × 12 означает: в пазу 12 эффективных проводников. В одном эффективном проводнике содержится 4 элементарных проводника d_ж = 1,6 мм и 5 элементарных проводников d_ж = 1,5 мм;
 – d_{из} – диаметр изолированного провода, мм

Таблица 2

Пробивная напряженность изоляции эмалированного провода (Eпр) в диапазоне диаметров 0,67–0,77 мм, изготовленного по старой технологии

Eпр кВ/мм	Кол-во образцов	Eпр кВ/мм	Кол-во образцов	Eпр кВ/мм	Кол-во образцов	Eпр кВ/мм	Кол-во образцов	Eпр кВ/мм	Кол-во образцов
72–74	1	88,1–90	0	104,1–106	3	120,1–122	1	138,1–140	0
74,1–76	0	90,1–92	0	106,1–108	1	122,1–124	1	140,1–142	0
76,1–78	0	92,1–94	6	108,1–110	4	126,1–128	0	142,1–144	0
78,1–80	2	94,1–96	2	110,1–112	3	128,1–130	0	144,1–146	1
80,1–82	0	96,1–98	3	112,1–114	3	130,1–132	0	146,1–148	0
82,1–84	1	98,1–100	3	114,1–116	4	132,1–134	0	148,1–150	1
84,1–86	0	100,1–102	1	116,1–118	1	134,1–136	0		
86,1–88	1	102,1–104	2	118,1–120	4	136,1–138	1		

Таблица 3

Пробивная напряженность изоляции эмалированного провода (Епр) в диапазоне диаметров 1,90–2,36 мм, изготовленного по старой технологии

Епр кВ/мм	Кол-во образцов	Епр кВ/мм	Кол-во образцов	Епр кВ/мм	Кол-во образцов	Епр кВ/мм	Кол-во образцов	Епр кВ/мм	Кол-во образцов
44–46	3	52,1–54	2	60,1–62	9	68,1–70	6	76,1–78	0
46,1–48	2	54,1–56	6	62,1–64	6	70,1–72	6	78,1–80	0
48,1–50	2	56,1–58	7	64,1–66	7	72,1–74	8	80,1–82	1
50,1–52	3	58,1–60	14	66,1–68	4	74,1–76	6	82,1–84	1

Таблица 4

Пробивная напряженность изоляции эмалированного провода (Епр) в диапазоне диаметров 1,32–2,90 мм, изготовленного по новой технологии

Епр кВ/мм	Кол-во образцов	Епр кВ/мм	Кол-во образцов	Епр кВ/мм	Кол-во образцов	Епр кВ/мм	Кол-во образцов	Епр кВ/мм	Кол-во образцов
84,1–86	2	100,1–102	0	118,1–120	0	136,1–138	10	152,1–154	0
86,1–88	0	102,1–104	3	120,1–122	3	138,1–140	9	154,1–156	3
88,1–90	0	104,1–106	6	122,1–124	9	140,1–142	0	156,1–158	3
90,1–92	0	106,1–108	2	126,1–128	12	142,1–144	9	158,1–160	10
92,1–94	0	108,1–110	0	128,1–130	0	144,1–146	4	160,1–170	1
94,1–96	2	110,1–112	3	130,1–132	4	146,1–148	1		
96,1–98	1	112,1–114	3	132,1–134	6	148,1–150	7		
98,1–100	2	116,1–118	11	134,1–136	1	150,1–152	3		

достигнуто за счет совмещения процессов волочения и эмалирования проводов, высокого качества основных материалов и применения ряда важных для обеспечения стабильности параметров вспомогательных технологических процессов.

В связи с изложенным при сравнительном анализе старой и современной технологий объективно следует сравнивать

не пробивное напряжение $U_{пр}$, а пробивную напряженность электрического поля $E_{пр}$ (кВ/мм).

В табл. 2–4 и на рис. 1–4 представлены сравнительные статистические показатели пробивной напряженности, достигаемые при использовании старой и современной технологии производства эмалированных проводов.

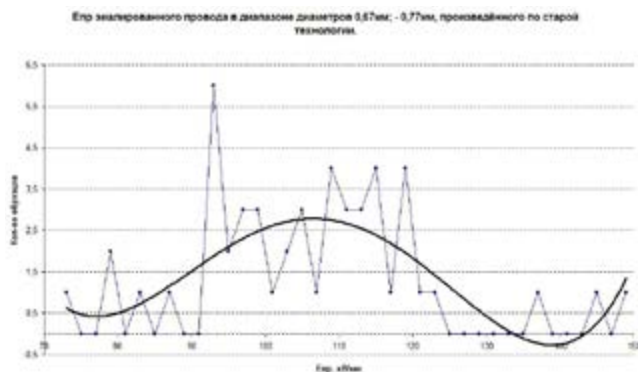


Рис. 1. Графическое изображение данных табл. 2

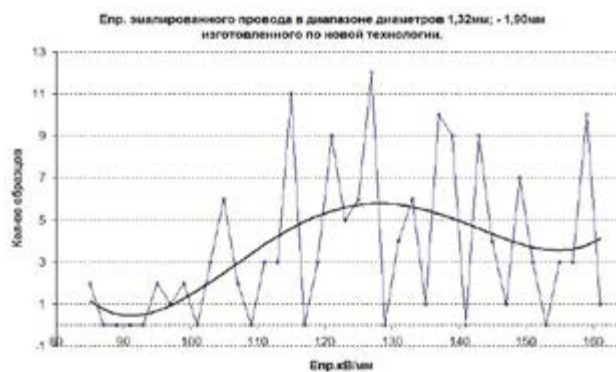


Рис. 3. Графическое изображение данных табл. 4

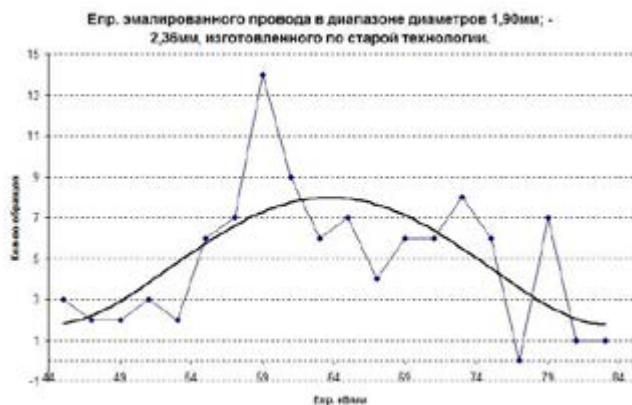


Рис. 2. Графическое изображение данных табл. 3

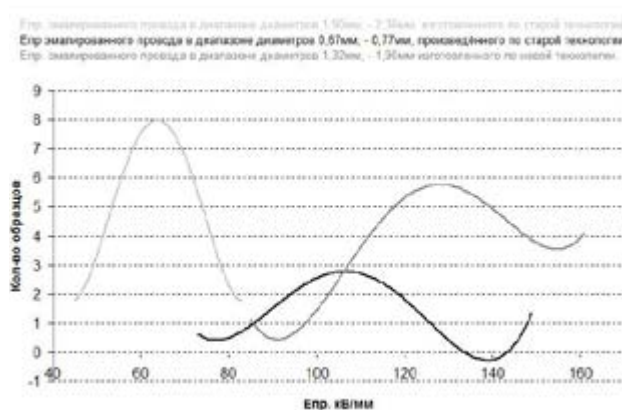


Рис. 4. Совместное представление графиков рис. 1–3

Из анализа графиков, приведенных на рис. 1–4, видно, что уровень напряженности электрического поля, которое выдерживают современные конструкции эмалированных проводов, до двух раз превышает параметры эмальпровода, изготовленного по старой технологии. При этом надо учесть, что на графике, отражающем показатели старой технологии, не представлены статистические данные забракованного в процессе приемо-сдаточных испытаний эмальпровода. Уровень брака достигал 5 % от объема выпуска. При статистическом учете забракованного эмалированного провода кривая минимальных значений пробивной напряженности приблизится к нулевым значениям.

В то же время современная технология позволяет изготавливать эмалированный провод с уровнем дефектности, стремящимся к нулю. Так, для эмалированного провода диаметром 1,00 мм имеем $Unp > 10,0$ кВ для 95 % образцов; $Unp > 8,0$ кВ для 99,8 % образцов. При этом в действующей конструкторской документации величина Unp установлена равной лишь 4,9 кВ. Очевидно, что фактически достигнутый уровень электрической прочности изоляции значительно превышает нормы, предусмотренные конструкторской документацией; для большинства электрических двигателей он избыточен и при их проектировании не используется.

На рис. 5 показана диаграмма, отражающая соотношение геометрических размеров для эмалированного провода диаметром 1,00 мм.

Условно показана половина диаметральных размеров эмалированного провода, стрелки отражают диаметральные размеры.

На диаграмме представлены следующие показатели:

- минимальное и максимальное значения электроизоляционного слоя, установленные нормативной документацией;
- фактическое изменение толщины электроизоляционного слоя при изготовлении партии эмальпровода в объеме 5 т;
- толщина электроизоляционного слоя, рекомендуемая к применению в соответствии с [2];
- расчетная толщина электроизоляционного слоя 0,02 мм, которая обеспечивает необходимый уровень испытатель-

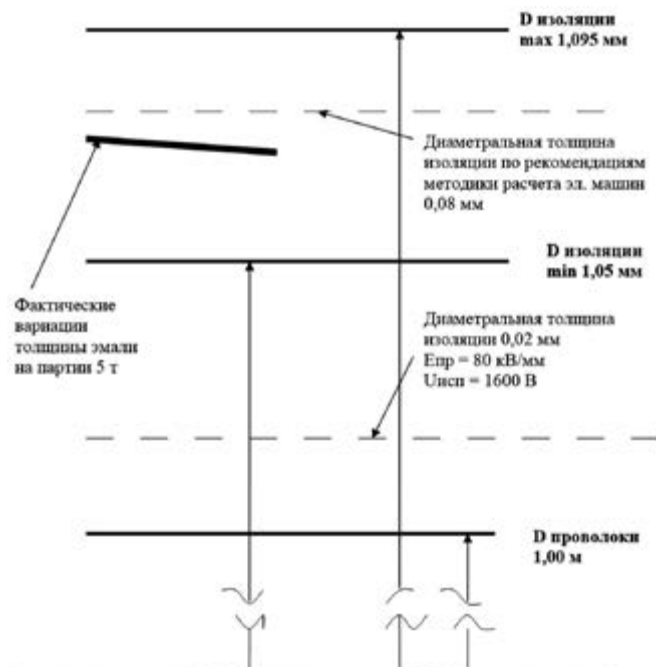


Рис. 5. Стандартная конструкция эмалированного провода типа ПЭТ 155 диаметром 1,00 мм. Условно отображена половина диаметра эмалированного провода

ного напряжения 1600 В для электродвигателя на рабочее напряжение 220/380 В при E_{np} электрической изоляции равной 80 кВ/мм; (нижняя пунктирная линия);

- фактическая вариация толщины покрытия при изготовлении партии эмальпровода в количестве 5,0 т, равная 1 мкм, что можно оценить как ошибку измерения.

Таким образом, современная технология позволяет изготавливать крупные промышленные партии эмалированного провода со значительно уменьшенными допусками на толщину электроизоляционного покрытия.

Совместное рассмотрение графиков, приведенных на рис. 1–4, и диаграммы, показанной на рис. 5, позволяет сделать вывод о возможности значительного снижения толщины электроизоляционного покрытия эмальпровода с сохранением расчетного для электродвигателя уровня электрической прочности изоляции. Снижение толщины изоляционного слоя на эмалированном проводе приводит к снижению объема изоляции в объеме паза и к соответствующему увеличению объема меди.

В нашем примере для эмалированного провода диаметром 1,00 мм, применяемого для электродвигателя на рабочее напряжение 220/380 В, достаточно радиальной толщины электроизоляционного слоя 20 мкм. Объем меди в пазу электрической машины за счет снижения объема электрической изоляции возрастает, коэффициент заполнения паза $K_{паз}$ увеличивается. Пропорционально увеличению сечения провода снизится плотность тока и квадратично уменьшатся электрические потери в обмотке статора P_{cu} .

При применении эмальпроводов с меньшей толщиной электроизоляционного слоя необходимо учитывать ряд дополнительных факторов.

Во-первых, снижение объема изоляции в пазу электродвигателя ведет к увеличению эквивалентной теплопроводности паза и, следовательно, к уменьшению нагрева обмотки. Это приводит к снижению сопротивления токопроводящей жилы, зависящего от температуры меди и, соответственно, к дополнительному снижению потерь P_{cu} , а также к повышению надежности электроизоляционного слоя.

Во-вторых, статистические данные показывают, что в проводах меньшего сечения, и, следовательно, с меньшей толщиной электроизоляционного покрытия, увеличивается пробивная напряженность (рис. 6). Таким образом, эффективный проводник, состоящий из нескольких элементарных проводников, может оказаться более надежным, чем эффективный проводник, состоящий из одного элементарного проводника с равным суммарным сечением. Иными словами, совокупный учет данных, приведенных на рис. 1–6, показывает, что при равной надежности больший объем меди окажется в эффективном проводнике, содержащем большее число элементарных проводников, что изменяет существующее представление о данном вопросе.

Кроме того, улучшается технологичность эмалированного провода при переработке во время изготовления обмотки электродвигателя. Упругость, как один из параметров, характеризующих жесткость эмалированного провода, наряду с рядом других факторов, зависит от толщины электроизоляционного слоя (рис. 7).

Улучшение электрических характеристик эмальпровода позволит пересмотреть в сторону снижения требования к пазовой, межслойной, межфазной изоляции, что даст дополнительное увеличение $K_{паз}$ и приведет к дополнительному снижению потерь P_{cu} .

Учитывая, что эмалированный провод при производстве электродвигателей учитывается и покупается по весу, увеличивается доля меди в 1 килограмме эмалированного

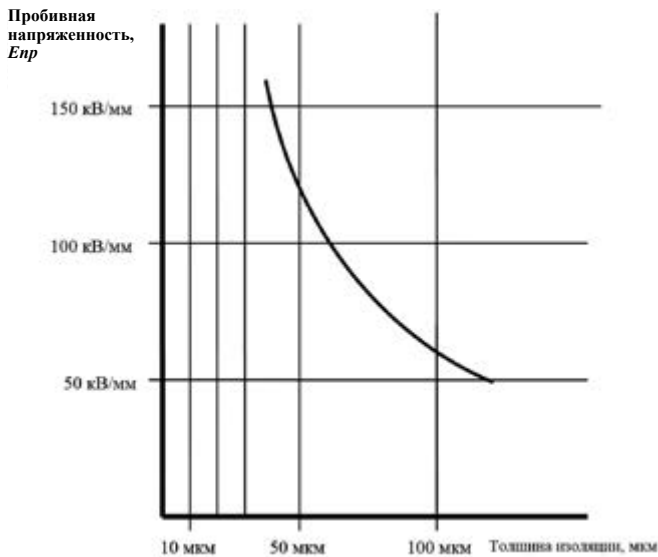


Рис. 6. Статистические данные зависимости пробивной напряженности от толщины электроизоляционного слоя эмалированных проводов

провода, что снижает расход эмалированного провода на производство электродвигателя.

При построении графиков, изображенных на рис. 6–7, использовались статистические данные испытаний более 50 образцов для каждого графика.

Результаты электромагнитных расчетов АЭД с применением обмоточных проводов, выполненных по новой технологии

Вернемся к табл. 1. Оценим расчетным путем улучшение электромагнитных характеристик АЭД за счет применения эмальпровода ПЭТ-155 по ТУ16.К71-160-92 с уменьшенной толщиной электроизоляционного покрытия. В качестве базовых расчетных диаметров жилы $D_{ж}$ примем ряд диаметров по ТУ16.К71-160-92. В качестве базовых расчетных диаметров изолированного провода $D_{из}$ примем

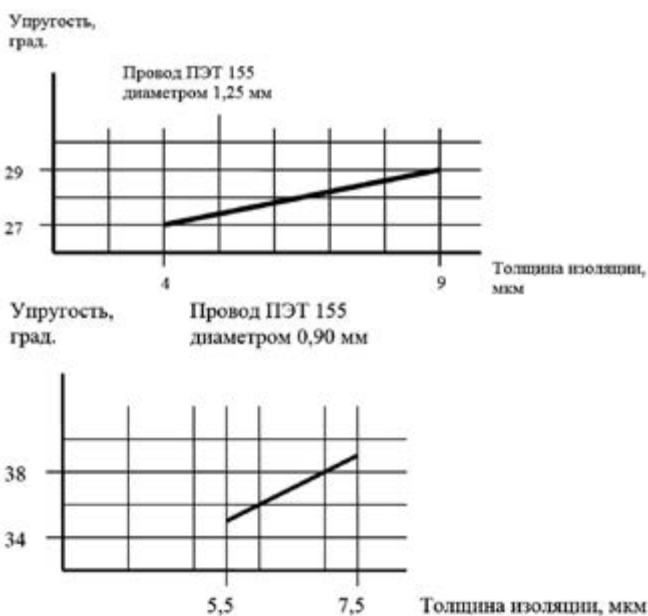


Рис. 7. Статистические данные зависимости упругости от толщины электрической изоляции эмалированного провода

средние диаметры изолированного провода ПЭТ-155 по ТУ16.К71-160-92. С учетом вышеизложенного материала (рис. 5, 6) для эмальпровода, изготовленного по новой технологии, диаметральный слой изоляции в отрезке ряда $D_{ж} = 0,9-1,6$ мм уменьшаем на 0,03 мм. При необходимости применим иной допустимый подход: сохраняем неизменным $D_{из}$, увеличивая при этом $D_{ж}$ на 0,03 мм.

В табл. 1 представлено 4 характерных примера расчета энергоэффективных двигателей.

А. Расчет «медного» двигателя малой мощности $P_n = 1,5$ кВт, $2p = 4$; здесь и далее используется увязка СЭВ (ГОСТ 31606-2012, вариант увязки I). С позиции обеспечения высокой энергоэффективности увязка СЭВ для малых АЭД весьма неудачна*, поскольку для равных мощностей предусматривает меньший активный объем, или для равных объемов предусматривает больший КПД [3]. Обычными средствами не удается получить двигатель класса IE2 в удовлетворительном объеме, даже применив более дорогую электротехническую сталь 2412 с уменьшенными удельными потерями, поз. 2. Использование же эмальпровода с уменьшенной толщиной изоляции решает задачу обеспечения класса IE2, поз. 3. При этом стоимость активных частей C_{act} ниже.

В. Расчет «медно-железного» АЭД средней мощности $P_n = 11$ кВт, $2p = 4$. Энергоэффективный АЭД с обычным проводом получается на активной длине пакета $L_s = 200$ мм с применением стали 2412, поз. 5. Использование провода с уменьшенной изоляцией решает задачу обеспечения класса IE2 на длине $L_s = 180$ мм, поз. 6. Стоимость активных частей в обоих случаях одинакова.

С. Расчет «медно-железного» АЭД средней мощности $P_n = 30$ кВт, $2p = 4$. Двигатель соответствует габариту 180, который в увязке СЭВ и с внешним диаметром от серии АИР является самым неудачным в плане энергоэффективности. Класс IE2 с обычным проводом получается с применением стали 2412, поз. 8. С новым проводом энергоэффективность IE2 обеспечивается с применением стали 2212, поз. 9. При этом стоимость активных частей C_{act} ниже.

Д. Расчет «железного» АЭД старшей мощности $P_n = 200$ кВт, $2p = 4$. Данный двигатель и в предыдущей серии 5AM имел высокий класс энергоэффективности IE2, поз. 10. В новой серии 7AVE за счет оптимизации активной геометрии при IE2 достигнута экономия обмоточного провода G_{cu} более 18 кг, поз. 11. Класс энергоэффективности «высший» IE3 достигается применением более дорогой электротехнической стали 2412. Однако достичь класса IE3, сохранив сталь 2212, при одновременном применении нового эмальпровода здесь, в отличие от пп. в, с, не получается, поскольку удельный вес P_{cu} для машин старшей мощности, как отмечалось выше, невелик.

Наряду с безусловной эффективностью нужно отметить некоторые моменты, которые необходимо учитывать при оценке возможности применения данной методики конструирования и организации производства электродвигателей.

1. Надежность электродвигателя при использовании эмальпровода, имеющего минимальную расчетную толщину изоляции, обеспечивается, наряду с высокой стабильностью параметров эмальпровода, строгим соблюдением регламентов современной технологии изготовления электродвигателей. В этой технологии должны быть

* Стандарт IEC 60034-30-1 устанавливает классы энергоэффективности, привязывая их к мощностям и числу пар полюсов вне зависимости от увязок. Однако евроатлантическое происхождение стандарта ориентировано на удобную в плане энергоэффективности увязку CENELEC и близкие к ней.

полностью исключены процессы, приводящие к критическим нарушениям электроизоляционного покрытия.

2. Существует предубеждение, что использование эмалированного провода с индивидуально регламентированными параметрами уменьшит количество поставщиков эмалированного провода, способных обеспечить данные параметры, что приведет к увеличению стоимости за счет отсутствия конкуренции. Такое предубеждение относительно недавно имело под собой достаточно оснований. Сейчас необходимо отметить, что большинство предприятий России обладают современной технологией производства и имеют необходимый технический потенциал для реализации изложенных принципов проектирования и применения эмалированных проводов.

3. Использование материалов, имеющих нормированные параметры для конкретных электротехнических изделий, имеет давнюю общемировую практику. Современное развитие мировой технологии имеет тенденцию к повышению точности конструкций и технологии изготовления изделий, постоянному обновлению используемых материалов. Иначе невозможно обеспечить разработку изделий, имеющих лучшие показатели, оптимальную конструкцию и минимальную себестоимость производства. Предприятия, не прилагающие усилия для внедрения современных технологий, вынуждены оставаться с устаревшим ассортиментом изделий.

Выводы

1. Эмалированные провода, изготавливаемые по старой раздельной технологии волочения и эмалирования, имеют низкий уровень пробивного напряжения и большой процент брака по данному показателю; наблюдается большой статистический разброс по толщине эмалевого покрытия. Эмалированные провода, изготавливающиеся по современной совмещенной

технологии, имеют высокий уровень пробивного напряжения при малом проценте брака по данному показателю; резко снижен разброс по толщине эмалевого покрытия.

2. Высокий уровень Unp в современных эмальпроводах и легкость реализации нужной толщины изоляции для обеспечения конкретных условий эксплуатации вновь проектируемых АЭД позволяют применить новую методику выбора эмальпроводов. Суть ее в следующем. *Оптимальная толщина электроизоляционного покрытия подбирается персонально для каждого проектируемого типоразмера АЭД с учетом показателей по надежности.* При этом снимается проблема дискретности варьирования диаметра провода при оптимизации.

3. Для АЭД малой мощности переход на обмоточный провод с минимально допустимой толщиной изоляции позволяет увеличить на ступень класс энергоэффективности с сохранением активной геометрии. Для АЭД средней мощности такой переход позволяет увеличить на ступень класс энергоэффективности при меньших затратах на активные материалы, чем при использовании стандартного эмалированного провода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Постников И.М. Проектирование электрических машин. – Киев: Гос. изд. техн. литературы, 1960. – 910 с.
2. Копылов И.П., Клоков Б.К., Морозкин В.П., Токарев Б.Ф. Проектирование электрических машин / под ред. И.П. Копылова. – М.: Высшая школа, 2005. – 768 с.
3. Кобелев А.С., Макаров Л.Н. Выбор внешнего диаметра сердечника статора для энергоэффективных асинхронных двигателей / Сборник научных трудов XVI Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электро-технологии». – Иваново, 2011. – Том 3. – С. 188–192.

Процесс производства провода становится непрерывным благодаря нашим замечательным британским сварочным аппаратам

Как и остальные члены нашей команды, наш инженер-конструктор Иван – специалист по холодной сварке. Его надежные, не требующие большого объема техобслуживания установки, основаны на последних технологических решениях, для того чтобы помочь Вам увеличить производительность, обеспечить конкурентное преимущество и повысить рентабельность инвестиций.

Видеодемонстрация на сайте www.pwmltd.co.uk



Обращайтесь к нашим агентам в России:
 Торговый Дом ВНИИКП
 Шоссе Энтузиастов, 5 Москва 111024
 Телефон: (495) 361-6424, 918-1756
 Факс: (495) 911-8060
 E-mail: equipment@tdvniikp.ru

Pressure Welding Machines Ltd
 Tel: + 44 (0) 1233 820847
 Fax: + 44 (0) 1233 820591
 E-mail: pwm@btinternet.com
www.pwmltd.co.uk

