

## ИСПЫТАНИЯ МОЩНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ТЕРМОРЕАКТИВНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

А. Н. Зувев, Л. Я. Кленштейн, В. Г. Рязанов, В. Г. Сяков, М. З. Туллер

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин  
и общей электротехники)

На Новосибирском заводе «Сибэлектротяжмаш» внедрена термо-реактивная изоляция Монолит-II для катушечных обмоток крупных электрических машин, разработанная ВЭИ совместно с СибНИЭТИ. Изолированные сухой стеклослюдинитовой лентой катушки укладываются в сердечник, который затем пропитывается под вакуумом эпоксидным компаундом и подвергается запечке. Известно, что термореактивная изоляция отличается от компаундированной микалентной более высокими электрическими, механическими и теплофизическими характеристиками.

Проведены сравнительные испытания серийного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором типа АЗ-500/6000 (500 квт, 6 кв, 57 а, 3000 об/мин) и выполненного на его базе двигателя с изоляцией Монолит-II. Двигатели отличаются только типом изоляции, причем толщина ее одинакова. Естественно, двигатели имеют практически одинаковые электромагнитные показатели и расходы воздуха. Некоторые отличия в величинах тока холостого хода, потерях в стали и др. не превышают обычные отклонения, отмечаемые при контрольных испытаниях серийных двигателей.

### Электрические испытания изоляции

Двигатели выдержали регламентируемые ГОСТ 183-66 испытания. Сравнение величин диэлектрических потерь в прогретых до 45°С машинах приведено в табл. 1, из которой видно, что для изоляции Монолит-II они в диапазоне рабочих напряжений в 1,5 раза ниже.

Непосредственное сравнение электрической прочности типов изоляции нельзя выполнить, так как пробой обмоток не осуществлен с целью сохранения двигателей, тем более, что по результатам испытаний только на одной паре двигателей сравнение неправомерно.

Таблица 1

U, кв	tgδ всей обмотки, %	
	Двигатель К (с компаундированной изоляцией)	Двигатель М (с изоляцией Монолит-II)
5,0	6,6	4,4
7,0	10,0	6,4

Испытания на образцах, изготовленных по принятой для Монолит-II технологии, показывают, что его электрическая прочность в 1,8—2,0 раза выше.

### Тепловые испытания двигателей

Двигатели оснащены теплоконтролем, позволяющим определять нагревы активной стали и потоков воздуха. Из-за технологических и конструктивных трудностей не поставлены термодатчики на активную медь статора.

Результаты измерений в некоторых характерных режимах приведены в табл. 2.

Таблица 2

№ режима	Характеристика режима	Тип двигателя	Напряжение	Ток статора	Механические потери	Потери в стали	Температура входящего воздуха	Расход воздуха	Средний перегрев воздуха в корзине лобовых частей	Средний перегрев зубцовой зоны сердечника статора	Средний перегрев обмотки статора
			кв	а	квт	квт	° С	м <sup>3</sup> /сек	° С	° С	° С
1	Вентиляционный	К	—	—	6,6		23,8	1,16		4,3	
		М	—	—	6,5		22,3	1,16		4,8	
2	Холостой ход	К	6,0	13,6		6,1	23,5		4,0	18,7	10,4
		М	6,03	13,7		7,1	22,9		4,0	15,5	11,1
3	Питание обмотки постоянным током	К	0,116	57,0			23,6		8,6	17,3	40,9
		М	0,115	57,1			22,6		8,0	15,4	25,8
4	С номинальным током и напряжением	К	6,01	56,9			16,6		8,6	54,5	59,9
		М	6,02	56,9			21,5		8,3	46,6	43,5

Сравнение данных режимов 3 и 4 показывает, что Монолит-II обеспечивает значительное снижение перегревов обмотки статора, причем не только вследствие ее более высокого коэффициента теплопроводности, но и благодаря тому, что при пропитке сердечника с обмоткой компаунд заполняет зазоры между катушками и стенками паза, пропитывает прокладки в пазах и бандажные вязки в лобовых частях.

Анализ испытаний (см. Приложение) показывает, что эквивалентная тепловая проводимость между медью и отводящей из обмотки тепло средой (сталью сердечника или воздухом в корзине лобовых частей) увеличилась в двигателе М примерно в 1,5 раза как в пазовой, так и в лобовой части. Средний перегрев обмотки статора двигателя М относительно входящего воздуха ( $t=40^{\circ}\text{C}$ ) в номинальном режиме ниже на  $16,5^{\circ}\text{C}$  ( $46,5^{\circ}\text{C}$  против  $63,0^{\circ}\text{C}$ ).

Обработка результатов показывает также, что при допустимом среднем перегреве обмотки  $80^{\circ}\text{C}$  двигатель К способен нести нагрузку 560 квт, а двигатель М — 670 квт, т. е. на 20% выше.

Приведенные результаты обработки пока следует рассматривать как качественные, так как только испытание ряда машин позволяет исключить возможное влияние случайных факторов (например, качество изготовления решетки лобовых частей, плотность наложения изоляции) и получить количественные соотношения. Однако следует все же ожидать значительного эффекта от применения Монолит-II, тем более, что ее высокая электрическая прочность позволяет уменьшить толщину корпусной изоляции примерно на 30%.

### Испытания изоляции на надежность.

Общепризнано, что максимальным температурным и механическим воздействиям изоляция подвергается в режиме пуска при максимальной допустимой его длительности. На двигателе М выполнено 1000 пусков при номинальном напряжении, с предельно допустимой по Техническим условиям маховой массой, причем режим работы между пусками подобран таким образом, чтобы средний перегрев обмотки статора перед очередным пуском был близок к перегреву в номинальном режиме (для имитации так называемого «пуска из горячего состояния»).

Затем было выполнено 50 режимов для определения способности изоляции выдерживать максимальные теоретически возможные колебания температуры обмотки. Охлажденный в среднем до  $-20^{\circ}\text{C}$  двигатель запускался с маховой массой, на 30% превышающей допустимую по Техническим условиям, затем отключался от сети и запитывался постоянным током  $1,2 \cdot I_{\text{ном}}$  (и) с доведением средней температуры обмотки до  $+150^{\circ}\text{C}$ .

После описанных режимов двигатель выдержал испытания изоляции на пробой при  $U=15\text{ кВ}$  (по ГОСТ-183—66 требуется 13 кВ). В процессе испытаний производились внешние осмотры состояния обмотки и измерения диэлектрических потерь. Состояние обмотки не отличается от исходного, величина  $\text{tg}\delta$  заметных изменений не претерпела.

\* \* \*

Исследования двигателя с изоляцией Монолит-II подтверждают ее высокие электрические, механические и теплофизические свойства и в целом показывают высокую эффективность ее применения в мощных высоковольтных электрических машинах.

### Приложение

Обработка тепловых испытаний выполнена в нижеследующем объеме и очередности.

1. По методу, изложенному в [1], произведена обработка режимов с  $I > 0,7 I_{\text{н}}$  (в них меньше влияет погрешность измерений) двигателя К. Определена средняя тепловая проводимость лобовых частей  $\lambda_1$  и величины тепловых потоков из пазовой части обмотки в лобовую  $q$  в каждом режиме.

2. По (8) из [1] определена величина  $q$  в режиме холостого хода двигателя К.

3. Во всех режимах определен удельный тепловой поток через изоляцию в пазовой части  $p_1 = p_2 - \frac{q}{l_2}$  и построены (рис. 1) зависимости среднего перегрева сердечника  $\Phi_{с2}$  от величины  $p_1$  для нагрузочных режимов с  $U=6\text{ кВ}$  (прямая а) и режима питания постоянным током (прямая б).

4. Если в первом приближении положить, что сердечники обоих двигателей идентичны в тепловом отношении во всем, что не связано с обмоткой статора (равенство геометрии, функции  $I_2(I_1)$ , расходов воздуха и др.), тогда для двигателя  $M$  функция  $\vartheta_{c2}(p_i)$  должна быть параллельна прямой  $a$  и расположена ниже на разность в величинах  $\vartheta_{c2}$  при холостом ходе двигателей (прямая  $b$ ), а функция, выраженная прямой  $b$ , должна быть справедлива и для двигателя  $M$ . По прямым  $b$  и  $v$  определены величины  $p_1$  (а следовательно и  $q$ ) во всех режимах двигателя  $M$ .

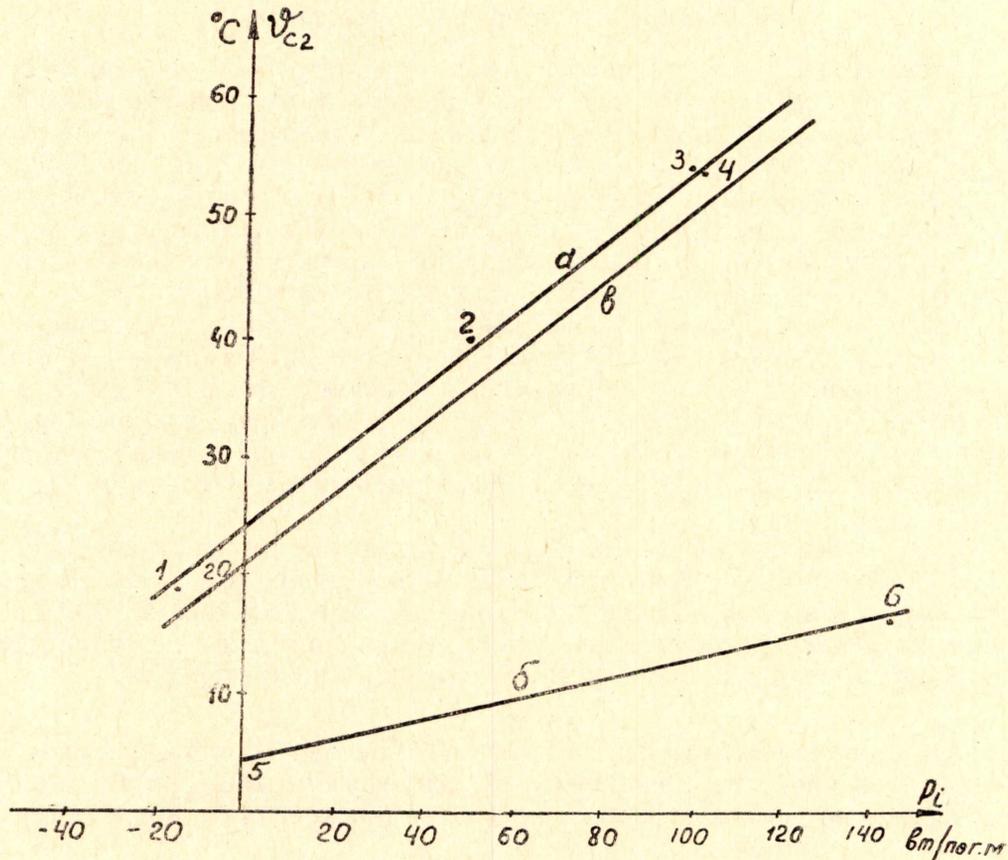


Рис. 1. 1 — холостой ход,  $U=1,0$ ; 2 — частичная нагрузка,  $U=1,0$ ;  $I=0,8$ ; 3, 4 — полная нагрузка,  $U=1,0$ ;  $I=1,0$ ; 5 — вентиляционный режим,  $U=0$ ;  $I=0$ ; 6 — питание обмотки постоянным током,  $I=1,0$

5. Для каждого режима система уравнений (8) и (10) из [1] решается относительно параметров  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  при известном  $q$ .

Затем определяются средние значения величин  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  двигателя  $M$ .

Для двигателя  $K$  была принята величина  $\lambda_2=6,55$   $\text{вт/пог. м } ^\circ\text{C}$ , что соответствует  $\lambda_1=0,16$   $\text{вт/м } ^\circ\text{C}$ . В итоге получены средние величины:

$$\lambda_2=6,55 \text{ и } \lambda_1=3,89 \text{ — для двигателя } K,$$

$$\lambda_2=10,0 \text{ и } \lambda_1=5,76 \text{ — для двигателя } M.$$

Относительные отклонения искомых величин  $\lambda$  от средних не превышают во всех режимах  $\pm 6\%$  (за исключением режима постоянного тока двигателя  $M$ , где, возможно, возрастает роль погрешностей измерений вследствие относительно низких  $\vartheta_{c2}$  и  $\vartheta_{\text{ср.обм.}}$ ). Величины  $\lambda$  двигателя  $M$  выше примерно в 1,5 раза.

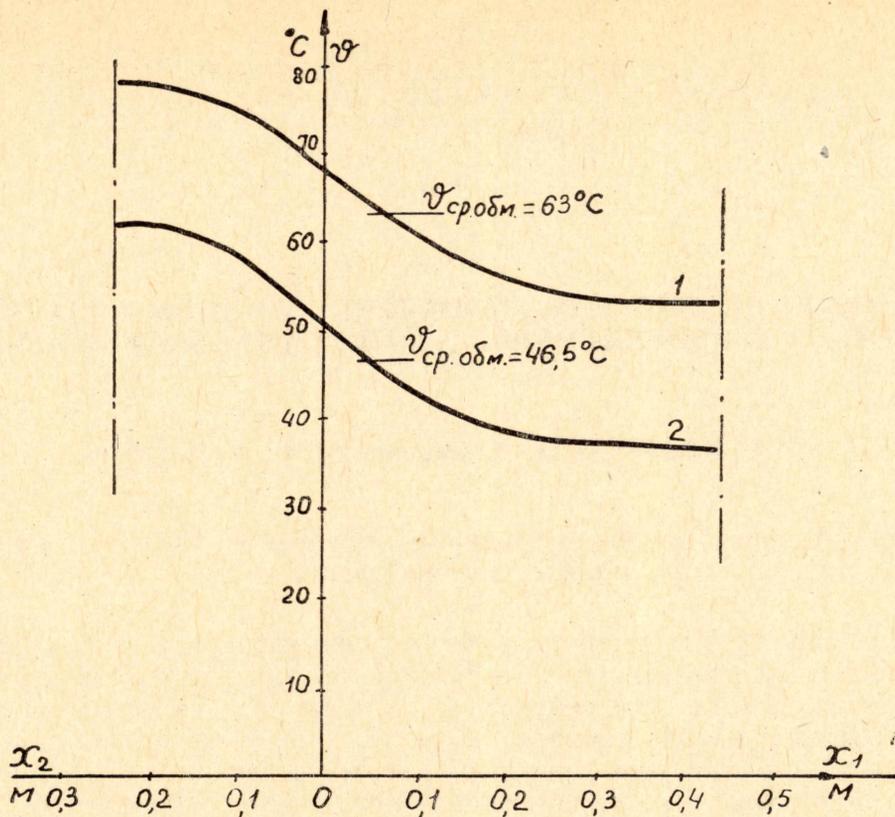


Рис. 2. Перегрев обмотки статора по длине катушек в номинальном режиме. 1 — двигатель К, 2 — двигатель М

На рис. 2 представлены кривые распределения перегревов обмотки статора обоих двигателей в номинальном режиме, полученные расчетом с использованием величин (\*) и функций  $\theta_{c2}(p_1)$  на рис. 1.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. Г. Рязанов. Оценка распределения температуры в обмотке при неравномерном ее охлаждении по длине (см. в данном сборнике).