

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ РОТОРНЫХ ОБМОТОК АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ. МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИИ

А.Б. Раднаев, Б.С. Доржиева

Томский политехнический университет, ИШЭ, ОЭЭ, группа А1-28

Научный руководитель: А.Г. Гарганеев, д.т.н., профессор ОЭЭ ИШЭ ТПУ

Асинхронные электродвигатели являются одними из самых распространенных типов электрических машин благодаря своей надежности, простоте конструкции и экономичности. Хотя большинство исследований сосредоточено на статорных обмотках, до 15 % отказов связано с роторными обмотками, что обусловлено термомеханическими напряжениями и недостаточным охлаждением [1]. Учитывая возрастающие удельные нагрузки, исследование теплового состояния роторных обмоток является актуальной задачей. В статье представлены результаты исследования с помощью аналитических и численных методов нестационарных режимов работы асинхронных двигателей, таких как пуск и торможение, а также методы оптимизации конструкции для снижения тепловых и механических нагрузок.

В переходных режимах, таких как пуск, торможение и перегрузки по моменту, увеличение скольжения приводит к усилению поверхностного эффекта, когда токи концентрируются на поверхности стержня, вызывая повышенный нагрев ротора и возникновения значительных термонапряжений. В совокупности с такими факторами как различные условия охлаждения, неравномерная пайка, несовершенство материала и других технологических факторов эти напряжения могут достигать пределов прочности материала, что приводит к деформации обмотки как например на рис. 1.

Наиболее тяжелыми режимами для ротора, с точки зрения термомеханических напряжений и нагрева, являются режим прямого пуска, частые пуски-остановки, работа на высоком скольжении (перегрузка) и условия недостаточного охлаждения. При прямом пуске асинхронный двигатель потребляет большой пусковой ток, который может достигать 5–7 номинальных значений, в то время как потери в клетке зависят от квадрата тока. Это приводит к значительному нагреву ротора за короткий промежуток времени. В режиме прямого пуска нагрев стержня сосредоточен в его наружных слоях, так как частота тока в клетке значительно выше, чем в номинальных режимах, это может привести к значительному локальному перегреву и механическим перенапряжениям.

Подъем температуры T , в течение заданного промежутка времени, можно рассчитать с использованием уравнения теплового баланса:

$$\frac{dQ}{dt} = mc \frac{dT}{dt}, \quad (1)$$

где Q – мощность потерь в стержнях; m – масса обмотки; c – удельная теплоёмкость материала клетки; t – длительность процесса.

По известному по расчёту пусковой характеристики току $I(t)$, тепловая мощность $Q(t)$ на каждом моменте времени может быть найдена как:

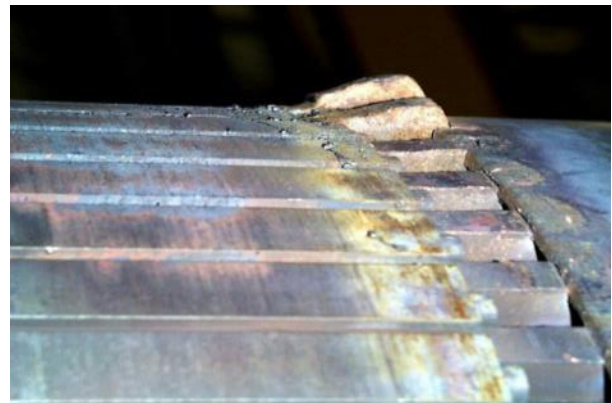


Рис. 1. Пример повреждения обмотки ротора асинхронного двигателя

$$Q(t) = R_{2\text{эф}}(t) \cdot I^2(t) + Q_{\text{доб}}(t), \quad (2)$$

где $R_{2\text{эф}}$ – эффективная составляющая сопротивления от полного активного сопротивления ротора R_2 , с учетом поверхностного эффекта; $Q_{\text{доб}}$ – другие виды потерь, такие как добавочные потери от вихревых токов и потерь на гистерезис, которые также проявляются с ростом частоты и дополнительно подогревают обмотку [2].

Добавочные потери от вихревых токов и потерь на гистерезис можно определить как [2]:

$$Q_{\text{доб}}(t) = Q_{\text{ес}}(t) + Q_h(t); \quad (3)$$

$$Q_{\text{ес}}(t) = k_{\text{ес}} f^2 B_{\text{max}}^2; \quad (4)$$

$$Q_h(t) = \eta B_{\text{max}}^{1.6} f_2(t), \quad (5)$$

где B_{max} – максимальная магнитная индукция; d – толщина листа магнитопровода; $\rho_{\text{ст}}$ – удельное сопротивление стали ротора; η – коэффициент потерь на гистерезис, зависящий от свойств материала (1,6–2); $k_{\text{вс}}$ – коэффициент, зависящий от свойств материала.

Температуру элементов ротора на каждом этапе пуска необходимо рассчитывать в несколько итераций, из-за температурного влияния на сопротивления и теплопроводности.

В табл. 1 приведены результаты расчёта при прямом пуске двигателя мощностью 3150 кВт и синхронной частотой 750 об/мин при напряжении 3,3 кВ.

Таблица 1. Результаты расчета времени пуска асинхронного двигателя

	Способ определения	
	Аналитический расчёт	Моделирование
Время, с	51,1	54,3

Время прямого пуска такого электродвигателя, работающего на вентиляторную нагрузку, составляет порядка 52 с.

На рис. 2 приведены результаты расчёта подъема температуры в обмотке ротора этого двигателя при адиабатном процессе.

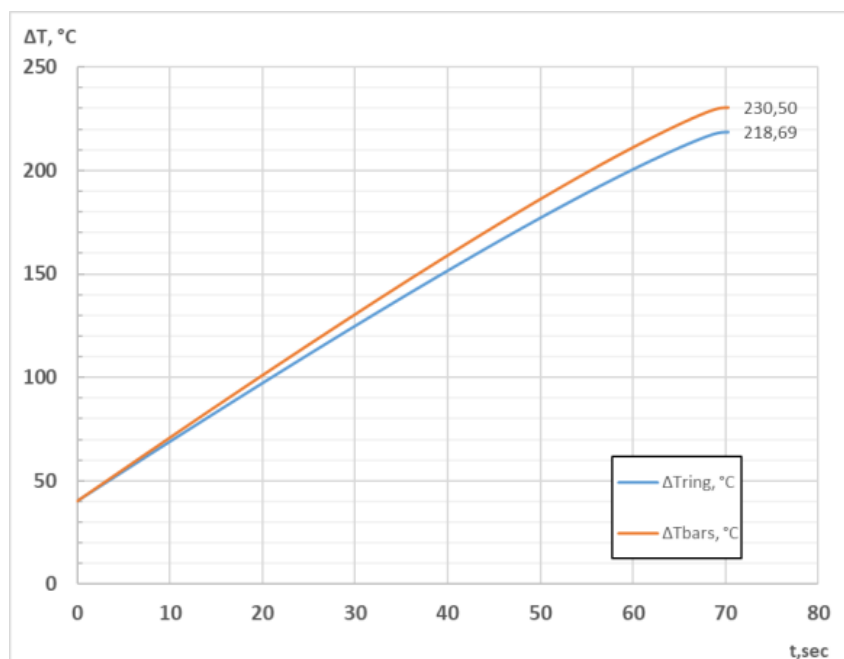


Рис. 2. Подъем температуры в клетке ротора за время пуска

На рис. 3 показано распределение потерь в стержнях ротора в начале и в конце пускового режима, где наглядно видно, что основная часть потерь локализуется в верхней части обмотки.

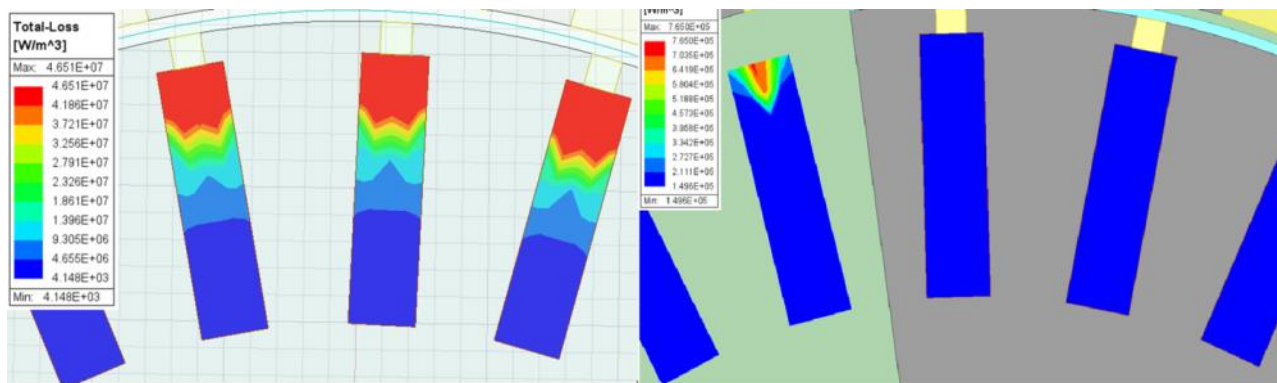


Рис. 3. Подъем температуры в клетке ротора за время пуска

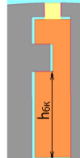
Методы оптимизации конструкции

Наиболее простым способом снижения нагрева роторной обмотки является увеличение площади поперечного сечения стержней, это позволяет значительно снизить нагрев обмотки за счет снижения плотности тока, уменьшения электрических потерь, увеличения массы и поверхности теплоотдачи. Однако данный способ хоть и является наиболее действенным, в то же время это ведет к увеличению габаритов машины и увеличению ее себестоимости.

Помимо снижения потерь другим способом снижения нагрева является сокращение времени пуска путем улучшения пусковых характеристик (увеличение пусковых моментов и снижение пускового тока). Улучшения пусковых характеристик без значительного увеличения расхода проводниковых материалов и применения фигурных пазов можно добиться подбором открытия паза ротора (ширина и высота шлица). Кроме улучшения пусковых характеристик и соответственно снижения времени пуска, правильно подобранные высота и ширина шлица позволяют значительно снизить добавочные потери в клетке ротора вызывающие дополнительный подогрев [3, 4], а также увеличить механическую жесткость самого шлица для предотвращения отгиба стержня от термонапряжений.

Также для улучшения пусковых характеристик в ответственных энергосистемах рекомендуется использование бокового ферромагнитного клина. В табл. 2 приведены результаты численного моделирования асинхронного двигателя с применением бокового клина.

Таблица 2. Влияние расположения бокового клина на пусковые характеристики двигателя

Эскиз	Высота расположения клина, мм	Кратность пускового тока, о.е.	Кратность пускового момента, о.е	Время пуска, с	Без клина		
					Кратность пускового тока, о.е.	Кратность пускового момента, о.е	Время пуска, с
	10	6,8	2,05	52,6	6,6	2,1	51,1
	15	6,6	2,26	49,6			
	20	6,5	2,4	48,6			
	25	6,3	2,6	43,2			
	35	6,4	2,5	43,5			

Из полученных результатов можно сделать вывод, что расположение бокового клина как можно ближе к поверхности бочки ротора позволяет улучшить пусковые характеристики асинхронного двигателя при сохранении высоких энергетических показателей. Оптимальным с точки зрения улучшения пусковых характеристик является расположение бокового клина в третьей четверти по высоте паза ротора. Такое расположение обеспечивает высокие энергетические показатели машины, наряду с сохранением простоты и надежности крепления стержня в пазу ротора [5].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A Survey of Condition Monitoring and Protection Methods for Medium-Voltage Induction Motors, Georgia Institute of Technology, USA / P. Zhang, Y. Du, T. G. Habetler and B. Lu// IEEE Transactions on Industry Applications. – 2011. – V. 47. – P. 34–46.
2. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. – СПб.: Изд-во Питер, 2008. – 350 с.
3. Геллер Б., Гамата В. Дополнительные поля, моменты и потери мощности в асинхронных машинах. – М.: Энергия. 1964. – 263 с.
4. Геллер Б., Гамата В. Высшие гармоники в асинхронных машинах. – М.: Энергия. 1981. – 352 с.
5. Корнеев К.В. Переходные процессы в специальных асинхронных двигателях: автореф. дис. ... к.т.н. – Новосибирск, 2011. – 19 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ ТАДЖИКИСТАНА

О.А. Пичугова

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
УралЭНИН, кафедра АЭС, группа ЭМ-230101

Научный руководитель: А.О. Егоров, к.т.н., доцент АЭС, УралЭНИН, УрФУ

По данным [1, 2] по состоянию на 01.01.2022 установленная мощность электростанций энергосистемы Таджикистана составляла 6626 МВт, а выработка электроэнергии – 20,624 млрд кВт·ч по итогам 2021 года. При этом установленная мощность гидроэлектростанций Таджикистана составила 5908 МВт (89 %), а выработка электроэнергии – 18,967 млрд кВт·ч (92 %). По официальным данным Правительства Таджикистана, гидроэнергетический потенциал страны оценивается более чем 100 ГВт с выработкой 527 млрд кВт·ч электроэнергии в год [3–5].

Ранее при проведении изысканий по энергосистеме Таджикистана [6] было установлено, что в составе энергосистемы функционируют крупные ГЭС с установленной мощностью в диапазоне от 8,7 до 3000 МВт. В стране ведутся масштабные стройки объектов гидроэнергетики, поэтому за период с 2020 до текущего 2024 г. такие данные изменились. Актуальная по состоянию на 01.01.2024 структура состава ГЭС приведена в табл. 1.

Таблица 1. Структура состава ГЭС Таджикистана по состоянию на 01.01.2022

№	ГЭС	Диапазон	N _{ГЭС} , единиц	P _{уст.} , МВт	W _{ген.} , млн кВт·ч	КИУМ**
	По итогам 2021 г.			5 908,0	18 967,0	36,65 %
	На 01.01.2024*		13	5 721,6	22 730,0	45,35 %
1	Крупные ГЭС	≥ 250 МВт	4	5 030,0	19 200,0	43,57 %
2	Средние ГЭС	25,00–249,99 МВт	5	643,9	3 220,0	57,08 %
3	Малые ГЭС	5,00– 24,99 МВт	4	47,7	310,0	74,19 %

*Без учёта ГЭС установленной мощностью до 5 МВт, **Средневзвешенная оценка

Всего по состоянию на 01.01.2024 в Таджикистане функционируют 13 ГЭС установленной мощностью от 5 МВт и выше, их суммарная мощность составляет 5721,6 МВт, а годовой объёмом выработки электроэнергии 22,7 млрд кВт·ч.

Одним из явных приоритетов научных изысканий и разработок в области электроэнергетики и гидроэнергетики, является поиск технологий, методов и ноу-хау, позволяющих повысить технологическую эффективность функционирования генерирующего оборудования. Так, для гидроэнергетики этот вопрос часто связан с увеличением объёма выработки электроэнергии при сохранении объёма расхода воды. В этом смысле энергосистема Таджикистана является уникальной и имеет ряд особенностей, среди которых можно выделить: