

В 40

ВЗРЫВОЗАЩИЩЕННОЕ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ:
В 40 Сборник научных трудов УкрНИИВЭ.-Донецк:
Кассиопа, 1999. - 220 с.

ISBN 966-7418-50-2

УДК 621.31-213.34

Редакционная коллегия:

И.Г.Ширнин, доктор технических наук, профессор
(общая редакция)

А.Н.Бурковский, доктор технических наук

Б.Н.Ванеев, кандидат технических наук

В.С.Дзюбан, доктор технических наук, профессор

С.В.Карась, доктор технических наук, профессор

Е.Б.Ковалев, доктор технических наук

Р.М.Лазебник, кандидат технических наук

В.Н.Савицкий, кандидат технических наук

А.М.Убийко, кандидат технических наук

Печатается по решению научно-технического совета
института (протокол № 4-99 от 30.11.99)

ISBN 966-7418-50-2

© Украинский научно-исследовательский проектно-
конструкторский и технологический институт взры-
возащищенного и рудничного электрооборудования
с опытно-экспериментальным производством, 1999
© Кассиопа, 1999

ВВЕДЕНИЕ

Для выхода Украины из глубокого экономического кризиса необходимо во что бы то ни стало добиться экономического роста. В этой связи весьма актуальна проблема развития взрывозащищенного и рудничного электрооборудования как основы безопасной и производительной работы предприятий базовых отраслей промышленности – угольной, химической, нефтеперерабатывающей, газовой, определяющих главным образом рост внутреннего валового продукта страны.

В сборнике научных трудов УкрНИИВЭ отражены результаты исследований и разработок, проведенных в 1998-1999 годах и направленных на создание новых конкурентоспособных видов взрывозащищенного электрооборудования. Отличительной особенностью данного сборника является наличие ряда статей, освещающих теоретические вопросы, позволяющих определить пути в создании принципиально новых взрывозащищенных изделий.

Сборник представляет интерес для специалистов энергомеханических служб предприятий со взрывоопасными условиями производства и будет полезен работникам НИИ и КБ, занимающихся разработкой и проектированием систем и агрегатов, использующих взрывозащищенное электрооборудование. Сборник может быть использован в учебной работе преподавателями, аспирантами и студентами вузов и техникумов соответствующих специальностей.

$$\Theta = 291 \left[1 - e^{-\left(\frac{2}{50,9 + (78,3 - 50,9)(1 - e^{-2/78,3})} \right)} \right] \cdot (1 + 1,05e^{-4 \cdot 2/78,3}) = 21,5 \text{ } ^\circ\text{C},$$

а в опыте $\Theta = 22,9 \text{ } ^\circ\text{C}$ (по сопротивлению);

при $t = 5$ мин: расчетное $\Theta = 47,5 \text{ } ^\circ\text{C}$, опытное $\Theta = 51,1 \text{ } ^\circ\text{C}$;

при $t = 10$ мин: расчетное $\Theta = 80,6 \text{ } ^\circ\text{C}$, опытное $\Theta = 83,3 \text{ } ^\circ\text{C}$;

2) допустимый ток статора за время работы $t = 5$ мин при $\Delta P_{\Sigma(\text{ст})} = 7576$ Вт; $\Delta P_c = 2311$ Вт;

первое приближение: $T = T_n; T_o = T_{o(n)}$,

$$p' = \frac{1}{\left[1 - e^{-\left(\frac{5}{42,6 + (65,5 - 42,6) \cdot (1 - e^{-5/65,5})} \right)} \right]} \cdot (1 + 1,05e^{-20/65,5}) = 5,32;$$

$$I'_{S2} = I_n \sqrt{\frac{5,32 \cdot 7576 - 2311}{7576 - 2311}} = 2,68 I_n;$$

второе приближение

$T_1' = 65,5[1 + 0,2(2,68 - 1)] = 87,5$ мин; $T_{oi}' = 42,6 \cdot 87,5 / 65,5 = 56,9$ мин;

учетом T_1' , $T_{oi}' - p'' = 6,71$; $I_{S2}'' = 3,03 I_n$; третье приближение

$T_1''' = 92,1$ мин; $T_{oi}''' = 60,3$ мин; $P''' = 6,94$; $I_{S2}''' = 3,08 I_n$.

Как видно, третье приближение дает незначительное повышение точности.

Вывод. Предложенный метод позволяет с достаточной точностью за ...3 шага расчета определить допустимую длительность работы АД при заданной нагрузке выше номинальной для режима S1 или его допустимый ток при заданном времени работы.

Список литературы

1. Бурковский А.Н., Макеев В.В. Исследование и аппроксимация режимов нагрева обмоток статора взрывозащищенных асинхронных двигателей в режимах S1, S2 //Техническая электродинамика.-1982.- №3.-С.8-14.
2. Бурковский А.Н., Титкова Т.О., Канашенкова Т.П., Макеев В.В. Определение допустимого тока статора взрывозащищенных асинхронных двигателей серии В, ВР в кратковременных режимах работы //Электротехническая промышленность. Электрические машины.-1978.- № 7(89).-С.5-7.
3. ГОСТ 23111-78. Двигатели асинхронные трехфазные короткозамкнутые взрывобезопасные серий В и ВР мощность от 0,25 до 110 кВт. Технические условия.-М: Изд-во стандартов, 1978.-41 с.
4. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей.-М.: Энергоиздат, 1985.- 216 с.

Ю.Е.Николаенко (Минпромполитики Украины),
А.Н.Бурковский (УкрНИИВЭ)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПУТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ С ТЕПЛОВЫМИ ТРУБАМИ ЗАКРЫТЫХ ОБДУВАЕМЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Тепловые трубы (ТТ) представляют собой устройства с высокой теплопроводностью и поэтому интересуют разработчиков электротехнических устройств как средство улучшения их технико-экономических показателей.

Известно значительное количество работ по исследованию эффективности применения ТТ для охлаждения закрытых асинхронных двигателей (АД). В этих работах рассматриваются конструкции с ТТ в роторах, в статорах, в роторах и статорах и для отведения тепла от внутреннего воздуха к наружному. Они могут быть эффективными при определенных рациональных размерах; при установлении этих размеров производят их взаимное сочетание с размерами активных частей АД для сохранения высоких энергетических и технико-экономических показателей. Исходя из этого, проведем анализ эффективности известных технических решений по применению ТТ в роторах и статорах закрытых АД с целью определения перспективности их применения в новых разработках обдуваемых АД закрытого и взрывозащищенного исполнения (внутренним воздухом в них отводится незначительная часть выделяемого тепла).

В указанных работах исследование эффективности ТТ в роторах и статорах закрытых АД проведено преимущественно для АД мощностью от 4...110 кВт основного исполнения, модификация с повышенным скольжением, для работы в повторно-кратковременных режимах, при частотном регулировании, с массивными роторами. Почти во всех случаях центробежные тепловые трубы (ЦТТ) в роторах имели испарительную зону в полости вала под сердечником ротора и различные конструктивные исполнения конденсационной зоны, охлаждаемой наружным воздухом.

В работе [1] приведены результаты исследования эффективности ТТ в роторах взрывозащищенных АД: у двигателя В100L4 (4 кВт) в серийном валу выполнена ЦТТ диаметром 16 мм, 25 % объема которой заполнено дистиллированной водой, с двумя конденсационными участками (серийный вентилятор с удлиненной в два раза втулкой, на втором конце вала - втулка с дисками и лопатками на них); применение ЦТТ позволило в номинальном режиме S1 снизить температуру обмотки статора Θ_1 на 3,2 %, а обмотки ротора Θ_2 - на 38 %; мощность двигателя при допустимом превышении температуры обмотки статора практически не изменилась. У

двигателя ВРС 132М6(7,5 кВт) в серийном валу установлена ЦТТ диаметром 25 мм, 25 % объема которой заполнено дистиллированной водой, с одним конденсационным участком - вентилятором; при роторе с нормальным скольжением (5,9 %) применение ЦТТ дало снижение Θ_1 на 1,5 °С; и Θ_2 - на 18 °С (на 16,5 %); при роторе с повышенным скольжением (14%) применение ЦТТ дало снижение Θ_1 на 19 %, а Θ_2 - на 30 %; мощность АД в режиме S1 при $\Theta_1 = 80$ °С увеличилась на 8 % по сравнению с АД без ЦТТ.

В работе [1] приведены результаты исследований шести общепромышленных АД на базе 4А180 (2р=2,4,8) с ЦТТ в валу (диаметр вала под сердечником ротора и со стороны вентилятора увеличен на 30 %, конденсационный участок выполнен в виде усеченного конуса; вентилятор-радиатор с удлиненной оребренной втулкой, посаженной на вал на пасте КПТ-8; в полость ЦТТ залито 40 см³ ацетона; элементы конструкции, отличные от серийных - вал, подшипниковый щит со стороны вентилятора и вентилятор); применение ЦТТ позволило снизить Θ_1 на 12,7...19 % (в среднем на 15 °С); у двухполюсных АД увеличение диаметра вала и использование его для создания ЦТТ диаметром 60 мм привело к снижению коэффициента мощности на 3..5 %, а коэффициент полезного действия (КПД) повысился в результате снижения добавочных потерь на 0,8...1,2 %. Кроме того, на базе двигателя 4А180М4 был изготовлен и испытан АД с ЦТТ: диаметр вала был оставлен без изменения, диаметр ЦТТ - 40 мм; применение такой ЦТТ в сочетании с вентилятором-радиатором дало снижение Θ_1 на 10 °С, что существенно меньше, чем у АД с увеличенным диаметром вала; отмечено, что целесообразна горячая посадка сердечника ротора на вал. В АД с повышенным скольжением 4АС160М4 при ЦТТ в роторе получено снижение Θ_1 на 20...26 °С, а Θ_2 на 72...83 °С (70 % тепла отводилось ЦТТ через вал с удлиненным до 200 мм концом и радиатором на нем, который обдувался воздухом со скоростью 15...20 м/с от двойного вентилятора, что позволило увеличить мощность на 20-25 % при допустимом превышении температуры серийной изоляции).

В соответствии с проведенными исследованиями [1], ЦТТ в валах особенно эффективны в АД с массивными роторами и частотно-регулируемых (т.е. при повышенных тепловых нагрузках в роторах и усиленном их охлаждении) при наличии высоко развитого радиатора на конденсационном участке (радиальные или кольцевые ребра) и вентилятор-наездника осевого типа, что позволяет у АД с высотой оси вращения $H = 100...160$ мм (1,5 - 18,5 кВт) получить снижение температуры обмотки статора более чем на 20 °С или соответствующее повышение мощности при допустимом превышении температуры.

Хорошие результаты получены при применении ЦТТ во взрывозащищенных АД типа В180S4 и В225М6 с массивными ферромагнитными эле-

ментами в цепи ротора, предназначенных для работы в повторно-кратковременных режимах и в режимах с регулированием частоты вращения. Обмотка ротора таких АД имеет стальные короткозамыкающие кольца и медные стержни. Применение ЦТТ в этих АД привело к снижению Θ_1 на 23...25 % и повышению КПД на 0,7...2,5 %, что позволяет повысить их мощность на 10...16 % [1].

Мероприятием, повышающим эффективность использования ЦТТ в АД с короткозамкнутым ротором, является также теплоизоляция ротора от воздуха в корпусе [1]. Для этого с короткозамкнутых колец ротора удаляют алюминиевые торцевые лопатки и по торцам ротора устанавливают теплоизолирующие кольца с торцевыми лопатками из материала с низким коэффициентом теплопроводности (т.е. лопатки работают только в качестве вентилятора, обдувающего лобовые части обмотки статора). При этом температура в пазах статора возрастает, а в лобовых частях снижается, что приводит к уменьшению неравномерности распределения температуры вдоль обмотки статора (для двигателя 4АС160М4 получена разность $\Theta_{1max} - \Theta_{1min} = 40$ °С при отсутствии ЦТТ, 34 °С при использовании ЦТТ, и 24 °С при использовании ЦТТ и теплоизоляции ротора; для двигателя 4А180М4 использование теплоизоляции ротора повышает эффективность применения ЦТТ на 33 %).

В работах [2, 3] приведены результаты исследования теплового состояния и параметров взрывозащищенного АД мощностью 55 кВт, $H = 250$ мм, 1500 об/мин, с ЦТТ в валу и с радиатором в конденсационной зоне в виде пучка трубок малого диаметра, размещенного в полости вала под вентилятором (при этом тепловое сопротивление конденсационной зоны снизилось более чем в 2,3 раза по сравнению с неоребреной конденсационной зоной в виде полого цилиндра, а коэффициент теплоотдачи с поверхности увеличился примерно в 1,8 раза); в номинальном режиме S1 в соответствии с протоколами испытаний получено снижение Θ_1 на 15,5 %, Θ_2 - на 35,2 %; за счет ЦТТ мощность увеличилась на 8 %, в другом образце - на 10 %). В АД мощностью 110 кВт такой же конструкции получено повышение мощности на 6 %; при допустимой температуре обмотки статора (изоляция класса Н) мощность может быть увеличена на 13,7...15 %. Во всех образцах КПД повысился на 0,2 %.

В работе [1] изложены результаты исследования взрывозащищенного АД мощностью 110 кВт, $H = 250$ мм, 1500 об/мин, с 18-го ТТ диаметром 16 / 20 мм, вставленными в каналы ротора (материал труб - латунь, хладагент-дистиллированная вода) так что конденсационные участки по обе стороны сердечника ротора охлаждаются наружным воздухом. Применение ТТ позволило при $\Theta_1 = 100$ °С получить мощность на 20 % больше мощности, которую имел бы этот АД, если бы аксиальные каналы ротора

продувались наружным воздухом, а по сравнению с неветилируемыми каналами ротора мощность повысилась на 38, 5 %.

Исследована конструкция ЦГТ в валу взрывозащищенного АД типа В280S4 (110 кВт) с расположением дополнительных испарительных камер в короткозамкнутых кольцах ротора (диаметр вала под его сердечником увеличен, что позволило получить ЦГТ диаметром 90 мм; вентилятор-радиатор с увеличенной площадью теплообменной поверхности по сравнению с серийным; полость ЦГТ заполнена дистиллированной водой на 27 %); в номинальном режиме S1 получено снижение Θ_1 на 20 %, Θ_2 – на 36 %; в усовершенствованном варианте возможно повышение мощности на 20 % [1].

В [4] предложено устанавливать ТТ в статоре: испарительная зона расположена в сердечнике, а оребренная конденсационная зона – за пределами подшипникового щита над вентилятором. Принципиально такая конструкция могла бы быть эффективной, если бы удалось рационально решить проблему ее сборки, ремонта и т.д. Применение ТТ в пазах, выполняющих роль пазовых клиньев [1], может быть эффективным в АД защищенного исполнения, т.е. при охлаждении конденсационных участков наружным воздухом.

В работе [5] предложена конструкция корпуса электрической машины с расположенными вдоль ее оси ТТ, имеющими форму ребер. Такое решение может быть эффективным при условии обеспечения минимально возможного теплового сопротивления между каждой ТТ и корпусом; кроме того, необходимо решить проблему защиты ТТ от механических повреждений.

В работе [6] рекомендуется применить испарительно-конденсационный контур статора в виде ТТ, расположенных вдоль оси электрической машины (конденсаторы расположены в межреберных каналах, испарители – между лобовыми частями обмотки статора и станиной), что позволяет не только уменьшить габариты машины, но и достичь максимально возможной длины испарительной и конденсационной частей. Здесь можно применить термосифоны, придав им Г или Л-образную форму и обеспечив такое взаимное положение испарителя и конденсатора, при котором слив конденсата в испаритель не вызывает затруднений. Но такая конструкция может быть высокоэффективной только в том случае, если пространство между лобовыми частями и корпусом, где расположены испарительные части ТТ, будет заполнено высокотеплопроводным компаундом. Проведенная расчетная оценка эффективности Г-образных термосифонов в серии АД типа ДМ (H = 80...180 мм) показала, что при теплопроводности компаунда $\lambda_{\text{к}} = 1$ кВт/мК Θ_1 снижается на 15...25 °С без ТТ и на 25...45 °С с ТТ; в некапсулированном варианте отмечено снижение Θ_1 на 8...9 °С при числе пар полюсов $2p=2$ и на 1...3 °С при $2p=8$. Затруднения с возможностью внедрения такого решения связаны с необходимостью капсу-

лировать лобовые части обмотки статора и принимать специальные меры по защите конденсационных участков ТТ от повреждений.

В [7] приведены результаты испытаний АД, в статоре которого размещено 36 аксиальных ТТ, а в роторе – 28 термосифонов, являющихся короткозамкнутыми стержнями, заполненными водой на 20...30 %; применение ТТ только в роторе позволило повысить мощность с 46 до 67 кВт; а в роторе и статоре – до 103 кВт.

Анализ изложенных результатов исследований по применению ТТ для охлаждения роторов и предлагаемых технических решений по охлаждению статоров позволяет отметить следующее:

1. В роторах закрытых и взрывозащищенных АД можно эффективно применять ТТ в АД с $H = 100...280$ мм (при всех стандартных частотах вращения) при Θ_2 роторов исходной конструкции 110...120 °С (чем выше Θ_2 ротора, тем эффективнее применение ТТ).

2. Для повышения эффективности ЦГТ в роторах АД с $H \leq 225$ мм необходимо увеличить диаметр вала под сердечником ротора и под подшипником со стороны внешнего радиатора на 25...35 % (на АД с $2p=2$ – на 20...25 %); при этом приобретают новые размеры подшипник и подшипниковый щит со стороны радиатора и вентилятор-радиатор.

3. Площадь теплообменной поверхности конденсационного участка ТТ (радиатора) должна быть максимально возможной (при условии эффективного обдува), эффективно отношение внешней площади поверхности теплопередачи конденсационной и испарительной части ТТ примерно от единицы до 1,5...2,6.

4. Тепловое сопротивление между сердечником ротора и испарительной ЦГТ, а также конденсационной зоной и радиатором должно быть минимально возможным (например, обеспечиваться горячей посадкой сердечника на вал, а радиатора – на конденсационный участок вала с применением теплопроводящих материалов, клеев и т.п.).

5. Для АД с нормальным уровнем скольжения целесообразно рассматривать применение ЦГТ в роторах, начиная примерно с мощностей 18,5 кВт до 55 кВт, а при мощности 75...110 кВт и более – ТТ в роторе с статоре; для АД с повышенными потерями в роторе (с повышенным скольжением, с массивным ротором и т.п.) ТТ в роторах весьма эффективны начиная с $H = 100...112$ мм; для АД мощностью свыше 110 кВт (примерно до 200...250 кВт) при $H = 250...280$ в роторах наиболее эффективной является установка системы трубок в аксиальных каналах с охлаждением конденсационных участков наружным воздухом.

На основании проведенного анализа представляется возможным сформулировать подходы и пути повышения технической и экономической эффективности систем охлаждения с ТТ для закрытых и взрывозащищенных обдуваемых АД:

а) выбор наиболее эффективной и надежной конструкции АД (исходя из его назначения, заданных габаритных размеров, режимов работы и т.д.),

типа системы охлаждения при ее предельном использовании с дополнительным включением ТТ;

б) определение (выбор, разработка) технических решений ТТ применительно к данной конструкции АД, отработка технологических процессов изготовления ТТ, обеспечивающих их минимальную стоимость, а также процессов их установки, обеспечивающих минимальные тепловые сопротивления в испарительной и конденсационной зонах;

в) расчетно-теоретический анализ и определение рациональных параметров и размеров конструкции АД и всех элементов его системы охлаждения;

г) технико-экономические расчеты эффективности конструкции АД с системой охлаждения, включающей ТТ;

д) уточнение ресурса ТТ в данной конструкции и режиме работы и проведение работ по повышению их ресурса в технически обоснованных случаях;

е) проработка вопросов ремонтпригодности АД, включающих ТТ;

ж) для взрывозащищенных АД с ТТ – решение вопросов их эффективного применения в средах Т4, Т5.

Вывод. Положительный экономический эффект разрабатываемая конструкция АД с применением ТТ может дать в том случае, если расчетная температура обмотки статора АД при дополнительно применении ТТ снижается более чем на 15...20 °С, а повышение мощности при допустимой температуре по сравнению с традиционной конструкцией составит не менее 5...7 %.

Список литературы

1. Тепловые трубы в электрических машинах / В.М.Петров и др.- М.: Энергоатомиздат, 1987.-157 с.
2. Севостьянов В.А., Бойко И.Г., Курносов Е.Д., Полянчиков И.А., Савчук Л.Ф. Исследование взрывозащищенного двигателя с тепловой трубой в валу// Взрывозащищенное электрооборудование: Сб. науч. тр. ВНИИВЭ.- Донецк, 1990.- С.96-101.
3. Бойко И.Г. Интенсификация систем охлаждения взрывозащищенных асинхронных двигателей малой и средней мощности: Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.т.н. - Харьков, 1992. – 24 с.
4. А.с. 541244 (СССР). Электрическая машина с испарительным охлаждением/В.И.Радин, М.Д.Петраков, Н.А.Серебро и др.// БИ.- 1976.-№ 48.
5. А.с. 645234 (СССР). Корпус электрической машины /Р.Б.Горобцов, Е.Б.Ковалев, В.К.Коробов // БИ.-1979.- № 4.
6. А.И.Борисенко, О.Н.Костиков, А.И.Яковлев. Охлаждение промышленных электрических машин.- М.: Энергоатомиздат, 1983.- 297 с.
7. Groll M., Krähling H., Münzel W. Wärmerohre zur Kühlung eines Electromotors//Elektrizitäts ver Wermung. -1979. - Bd 54, N 1,2. - S.10 - 15.

Ю.Л.Медведев, Л.С. Гольдин

К ВОПРОСУ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА СБОРКИ СЕРИЙНО ВЫПУСКАЕМЫХ АСИНХРОННЫХ КОРОТКОЗАМКНУТЫХ ВЗРЫВОЗАЩИЩЕННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

В условиях серийного производства взрывозащищенных асинхронных электродвигателей (АД) невозможно получить абсолютную симметрию воздушного зазора из-за допусков на изготовление сердечников статора, ротора и подшипниковых щитов, а также вследствие технологических отклонений при изготовлении и сборке АД. Асимметрия воздушного зазора приводит к появлению дополнительных усилий, превышающих иногда 60 % внутренних сил, действующих на опоры. Кроме того, асимметрия способна существенно изменить моментную характеристику АД. Как тот, так и другой фактор приводят к снижению их надежности и энергетических показателей.

Поэтому аналитическое определение влияния асимметрии и экспериментальные методы оценки этого влияния являются актуальными, ибо позволяют в условиях массового производства без разборки АД оценить точность сборки и отклонение эксцентриситета.

Если бы удалось установить существенную зависимость моментной характеристики от эксцентриситета воздушного зазора, то этот фактор мог бы быть использован для косвенной оценки качества механосборочных работ и нагруженности подшипниковых узлов. Однако такая зависимость мало изучена, и опубликованные данные по этому вопросу отсутствуют. Поэтому целью исследований являлось изучение влияния асимметрии воздушного зазора на параметры механической характеристики АД и получение зависимостей пускового, минимального и максимального моментов от относительного эксцентриситета. Это позволило бы получить данные о возможности косвенной оценки неравномерности воздушного зазора в серийно выпускаемых АД по изменению формы механической характеристики.

Известно [1], что вращающий момент АД создается приложенной к зубцам силой взаимодействия магнитного поля (индукции) воздушного зазора с токами в проводниках пазов ротора:

$$F = I_2 \cdot B_m \cdot l,$$

где I_2 - ток в пазу ротора; B_m - индукция в воздушном зазоре; l - активная длина сердечника статора.

Рассмотрим, как ведут себя эти два основных множителя под влиянием эксцентриситета воздушного зазора. Распределение индукции в воздушном зазоре определяется известным выражением: