

PACS: 44.10.+I, 44.35.+C, 44.90.+C

В.В. Мурга¹, И.В. Жихарев², С.А. Юрьев¹

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С ПОЛЫМ РОТОРОМ

¹Донбасский государственный технический университет, Алчевск

²Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина

Статья поступила в редакцию 29 января 2019 года

Рассмотрены различные способы интенсификации теплоотдачи с поверхности вращающегося полого ротора. Показано существование локальных перегревов на его поверхности, обусловленных наличием макровихревой структуры течения воздуха в зазоре между ротором и статором. На основе приведенных данных предложен способ охлаждения полого ротора электродвигателя и получены оптимальные значения сопротивления щелей ротора, обеспечивающие равномерный проток воздуха сквозь его поверхность.

Ключевые слова: электродвигатель с полым ротором, теплообмен, вращающийся проницаемый цилиндр

Электрические двигатели с полым ротором являются в настоящее время весьма распространенными исполнительными двигателями переменного тока. Они применяются в различных схемах автоматических устройств. Благодаря весьма малой массе полый ротор обладает незначительным моментом инерции – очень ценным свойством двигателя, способствующим его широкому распространению.

Одной из главных проблем эксплуатации электродвигателей является нагревание ротора. Его охлаждение осуществляется как воздушным (для двигателей малой мощности), так и жидкостным (для двигателей средней и большой мощности) способами [1]. Очевидно, что жидкостное охлаждение намного эффективнее воздушного, однако значительно осложняет конструктивное исполнение электродвигателя, связанное с подводом к вращающемуся ротору и отводом от него охладителя, а также с изоляцией его от токоведущих частей. Система охлаждения воздухом может быть достаточно эффективной при относительной простоте конструктивного исполнения.

Существует несколько способов повышения теплоотдачи с вращающейся цилиндрической поверхности ротора. К основным из них можно отнести увеличение скорости вращения, наложение вынужденного осевого течения, нанесение на поверхность рельефной структуры (например, продольных пазов). В работе [2] представлен анализ влияния различных способов интен-

сификации теплообмена между вращающейся цилиндрической поверхностью и потоком воздуха. Так, например, использование рельефной структуры поверхности незначительно повышает теплоотдачу, существенно увеличивая гидродинамические потери, а вынужденное осевое течение воздуха заметно усиливает теплоотдачу только при высоких значениях скорости осевого потока.

Более интенсивную теплоотдачу с вращающейся проницаемой цилиндрической поверхности можно получить за счет течения воздуха сквозь эту поверхность [3–5]. Сравнение различных способов повышения теплоотдачи представлено на рис. 1. Из рисунка видно, что проток воздуха через проницаемую поверхность обеспечивает значительный прирост теплоотдачи (кривая 2). Наличие шероховатостей и продольных пазов, а также увеличение скорости вращения ротора демонстрируют ограниченные возможности повышения теплообмена.

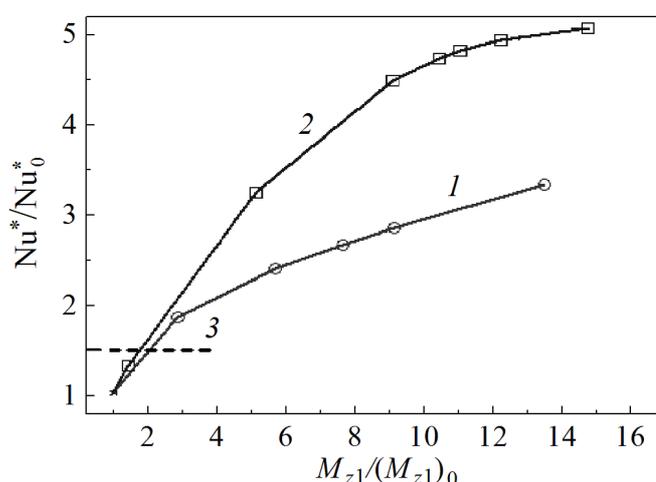


Рис. 1. Увеличение коэффициента теплообмена Nu^*/Nu_0^* в зависимости от прироста момента гидродинамического сопротивления $M_{z1}/(M_{z1})_0$ при проточе воздуха: 1 – вдоль непроницаемой гладкой поверхности ротора, 2 – через проницаемую поверхность, 3 – вдоль гладкой непроницаемой поверхности с нанесенными продольными пазами

Таким образом, используя вынужденное течение воздуха сквозь проницаемую поверхность ротора, можно повысить коэффициент теплоотдачи в 3–5 раз по сравнению со случаем непроницаемого гладкого ротора. Этот эффект, как минимум, на 20% выше, чем результат применения других известных способов интенсификации теплообмена, в частности комбинирования осевого потока воздуха и нанесения пазов на поверхности ротора.

При одинаковом увеличении момента гидродинамического поверхностного трения проток воздуха через поверхность проницаемого вращающегося ротора при его неизменной угловой скорости обеспечивает прирост коэффициента теплообмена, в 1.5–2 раза больший, чем при увеличении на порядок угловой скорости непроницаемого ротора [6].

В некоторых случаях важное значение имеет не только интенсивность теплоотвода от поверхности ротора, но и отсутствие его локальных перегревов, т.е. равномерность охлаждения всей поверхности. В большинстве практически значимых случаев при отсутствии протока воздуха в зазоре между ротором и статором электродвигателя имеет место макровихревое движение воздуха [7], следствием которого является неравномерность распределения температуры ротора в осевом направлении (рис. 2). Рассмотрим пример вращения ротора с радиусом $R_1 = 0.1099$ м и высотой зазора $h = 0.035$ м с угловой скоростью, соответствующей окружному числу Рейнольдса, характеризующему скорость вращения [2]:

$$\text{Re}_\varphi = \frac{WR_1^2}{\nu} = 1.6 \cdot 10^5, \quad (1)$$

где W – скорость вращения ротора, $W = \Omega R_1$ (Ω – угловая скорость вращения); ν – кинематическая вязкость воздуха.

При отсутствии протока воздуха через поверхность ротора осевая неравномерность распределения температуры составляет

$$\delta_T = \frac{T_1^{\max} - T_1^{\min}}{\bar{T}_1} = 31.6\%, \quad (2)$$

где T_1^{\max} , T_1^{\min} – соответственно максимальное и минимальное значения температуры поверхности ротора, \bar{T}_1 – средняя температура поверхности ротора.

Интенсивность вынужденного радиального течения воздуха в кольцевой области характеризуется радиальным числом Рейнольдса [2]:

$$\text{Re}_r = \frac{V_{r1}R_1}{\nu}, \quad (3)$$

где V_{r1} – скорость протока воздуха через поверхность проницаемого вращающегося ротора.

При протоке воздуха через 16 продольных щелей, выполненных в роторе с коэффициентом «живого» сечения $k_G = 0.17$ и скоростью протока, равной радиальному числу Рейнольдса $\text{Re}_r = 750$, средняя температура \bar{T}_1 снижается на 17.8%, а $\delta_T = 22.6\%$. При увеличении скорости протока воздуха до $\text{Re}_r = 1500$ снижение средней температуры поверхности ротора по сравнению со

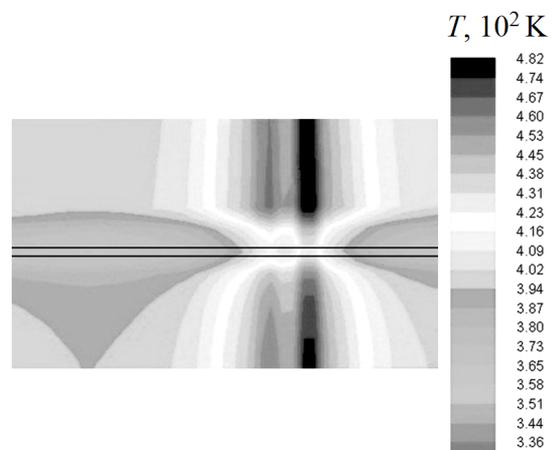


Рис. 2. Распределение температуры T вдоль поверхности вращающегося ротора (горизонтальными линиями условно показано расположение щели)

случае $Re_r = 0$ составляет 22%, а неравномерность ее температуры уменьшается до 8.5%.

При стабилизации течения за счет протока воздуха через щели неравномерность распределения температуры имеет место в окружном направлении. Чем выше угловая скорость и больше число щелей, тем ниже неравномерность распределения температуры.

С целью сравнения рассмотрим также данные для случая $Re_\phi = 4.1 \cdot 10^4$. При $Re_r = 0$ в условиях макровихревого движения воздуха величина $\delta_T = 56.5\%$. При $Re_r = 750$ и наличии 16 продольных щелей с $k_S = 0.17$ величина \bar{T}_1 снижается до 38%, а значение $\delta_T = 26\%$ характеризует окружную неравномерность распределения температуры при соответствующем значении угловой скорости и режиме течения воздуха без макровихрей. Дальнейшее увеличение скорости протока воздуха практически не дает снижения ни средней температуры ротора, ни неравномерности ее распределения в окружном направлении.

Таким образом, при относительно небольших значениях Re_ϕ рост величины Re_r свыше 500 малоэффективен с точки зрения понижения температуры ротора и неравномерности ее распределения. В этом случае следует увеличивать количество щелей либо повышать угловую скорость.

Поток воздуха, неравномерно проходящий через поверхность вращающегося ротора, приводит к существенному повышению локальных скоростей движения воздуха через щели и, как следствие, к неравномерному распределению температуры поверхности ротора [8]. Для устранения локальных перегревов и обеспечения равномерного охлаждения поверхности вращающегося ротора необходимо, чтобы весь поток воздуха протекал через поверхность одинаково вдоль щелей. Это обеспечивается посредством сочетания величин сопротивления проницаемой щели b_r и скорости протока воздуха, при которых коэффициент неравномерности протекания воздуха через вращающийся проницаемый цилиндр k_{vr} будет иметь минимальное значение [8].

Вместо размерного коэффициента сопротивления пористой щели b_r удобно рассматривать безразмерный аналог, учитывающий толщину и радиус щели [8]:

$$\tilde{b}_r = b_r \varepsilon_f R_1, \quad (4)$$

где ε_f – толщина пористой щели.

При невысоких скоростях вращения ротора ($Re_\phi = 10^4$) скорость радиального потока воздуха через его поверхность слабо сказывается на равномерности протока вдоль щели в диапазоне величин коэффициента сопротивления $\tilde{b}_r = 3.85 - 3.85 \cdot 10^3$. Дальнейший рост коэффициента сопротивления пористой щели приводит к значительному снижению коэффициента неравномерности k_{vr} (рис. 3,а).

Проток воздуха приобретает более существенную роль при равномерном распределении потока воздуха через поверхность ротора с ростом скорости его вращения (рис. 3,б,в).

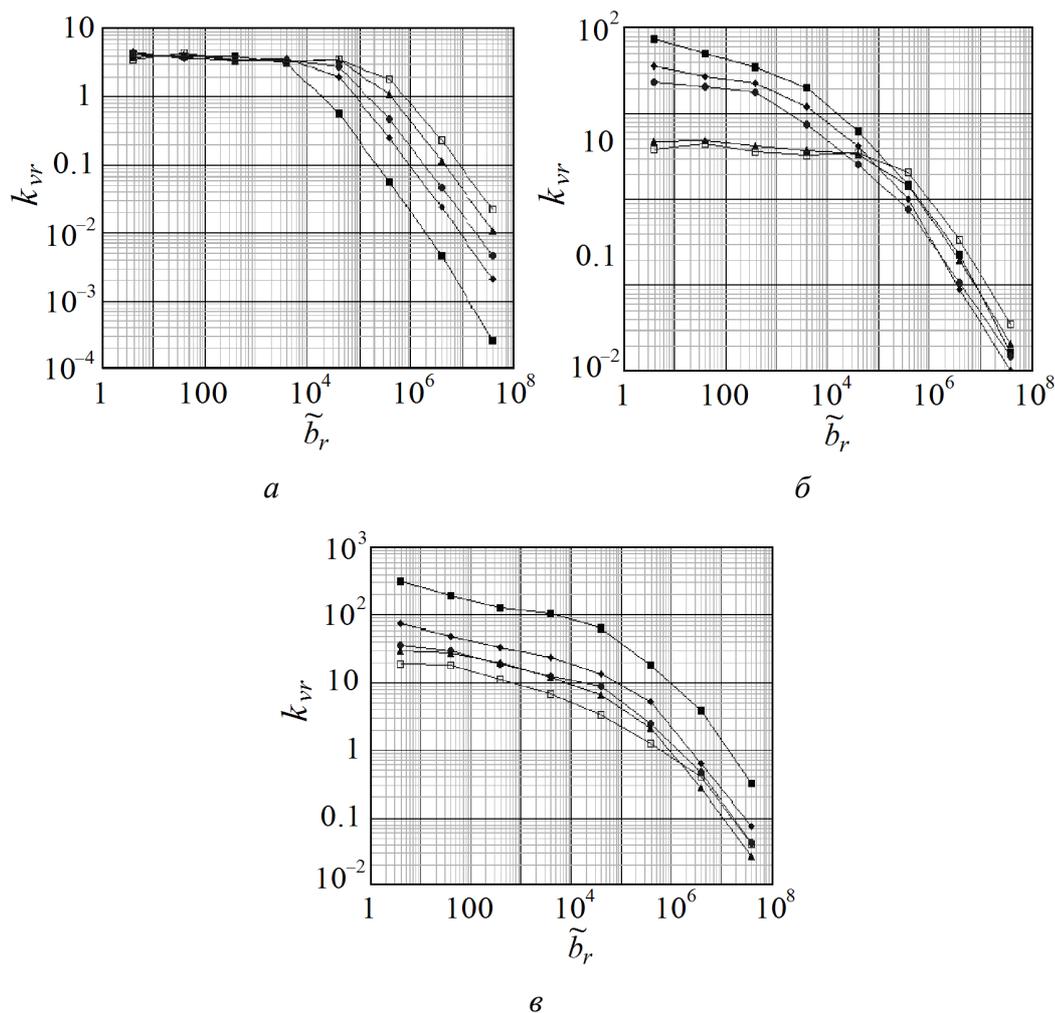


Рис. 3. Зависимость коэффициента неравномерности протекания воздуха через вращающийся проницаемый цилиндр от коэффициента сопротивления пористой щели и радиального числа Рейнольдса при окружном числе Рейнольдса $Re_\phi = 10^4$ (а), $5 \cdot 10^4$ (б), $2 \cdot 10^5$ (в): ■ – $Re_r = 100$, ◆ – 500, ● – 1000, ▲ – 2500, □ – 5000

Выводы

Применение наложенного вынужденного радиального течения воздуха через поверхность вращающегося проницаемого ротора позволяет увеличить коэффициент теплоотдачи с его поверхности от 3 до 5 раз по сравнению со случаем непроницаемого гладкого ротора.

Устранение локальных перегревов и равномерное охлаждение вращающегося проницаемого ротора обеспечиваются путем распределения протока воздуха сквозь его проницаемую поверхность. Для этого необходимо задать величину коэффициента сопротивления пористой щели \tilde{b}_r в диапазоне от $3.5 \cdot 10^5$ ($Re_r = 100$) до $3.5 \cdot 10^8$ ($Re_r = 5000$) для значений окружного числа Рейнольдса Re_ϕ от 10^4 до $2 \cdot 10^5$.

1. А.Б. Грумбина, Электрические машины и источники питания РЭА, Энергоатомиздат, Москва (1990).
2. Е.В. Мочалин, С.А., С.А. Юрьев, Технологический аудит и резервы производства **3**, № 1(11), 45 (2013).
3. Е.В. Мочалин, С.А. Юрьев, Промислова гідравліка і пневматика № 4(34), 11 (2011).
4. С.О. Юр'єв, Технологический аудит и резервы производства **5**, № 1(7), 19 (2012).
5. С.А. Юрьев, Всеукраїнська конференція «Відкриті фізичні читання»: Збірник тез доповідей, ДонДТУ, Алчевськ (2012), с. 39.
6. Е.В. Мочалин, С.А. Юрьев, Промислова гідравліка і пневматика № 3(41), 33 (2013).
7. Е.В. Мочалин, А.А. Халатов, Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил, Т. 8: Гидродинамика закрученного потока в ротационных фильтрах, Ин-т техн. теплофизики НАН Украины, Киев (2010).
8. С.А. Юрьев, Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета № 2(45), 136 (2015).

V.V. Murga, I.V. Zhikharev, S.A. Yuriev

IMPROVEMENT OF EFFICIENCY OF AIR COOLING OF AN ELECTRIC MOTOR WITH A HOLLOW ROTOR

Various methods of intensification of heat transfer from the surface of a rotating hollow rotor are considered. The existence of local overheatings on the rotor surface is shown that are due to the presence of the macro-vortex structure of air flow in the gap between the rotor and the stator. On the basis of the reported data, a method for cooling of a hollow rotor of an electric motor has been proposed. The optimal values of the resistance of the rotor slots are presented that ensure uniform air flow through the rotor surface.

Keywords: electric motor with a hollow rotor, heat exchange, rotating permeable cylinder

Fig. 1. Increase in heat transfer coefficient Nu^* / Nu_0^* depending on the increase in the moment of hydrodynamic resistance $M_{z1} / (M_{z1})_0$: 1 – an impermeable smooth surface, 2 – gas flow through the permeable surface, 3 – longitudinal grooves on smooth, impermeable surface

Fig. 2. Temperature distribution T along the surface of the rotating rotor (the horizontal lines mark the slot positions)

Fig. 3. Coefficient of non-uniformity of the flow of air through a rotating porous cylinder vs the resistance coefficient of the porous partition and the radial Reynolds number $Re_\varphi = 10^4$ (a), $5 \cdot 10^4$ (b), $2 \cdot 10^5$ (c): ■ – $Re_r = 100$, ◆ – 500, ● – 1000, ▲ – 2500, □ – 5000