

функционирование. Крайне важно учитывать не только настоящие потребности, но и рассчитывать на перспективу, создавать резервы в системе — это позволит снизить затраты на модернизацию в будущем.

Таким образом, комплексная оптимизация инфраструктуры энергоснабжения обеспечивает устойчивое развитие предприятия в условиях применения дорогостоящих энергоресурсов.

УДК 621.313.333

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ТОЛЩИНЫ КОЛЬЦЕВОГО РОТОРА ДИСКОВОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Ерошин С. С., Мирошник С. А.

Приведені результати досліджень залежності величини магнітної індукції в робочому зазорі дискового асинхронного двигуна від товщини ротора. Визначений характер зміни моменту, що обертає, від товщини ротора. Отримана аналітична залежність, що дозволяє розрахувати максимальну величину моменту, що обертає, від конструктивних параметрів дискового асинхронного двигуна.

Ключові слова: дисковий асинхронний двигун, магнітна індукція, кільцевий ротор.

Приведены результаты исследований зависимости величины магнитной индукции в рабочем зазоре дискового асинхронного двигателя от толщины ротора. Определен характер изменения вращающего момента от толщины ротора. Получена аналитическая зависимость, позволяющая рассчитать максимальную величину вращающего момента от конструктивных параметров дискового асинхронного двигателя.

Ключевые слова: дисковый асинхронный двигатель, магнитная индукция, кольцевой ротор.

Results of researches dependence magnetic induction in an operating clearance of the disk asynchronous motor from thickness of the rotor are submitted. Character change of the torque from thickness of a rotor is defined. The analytical dependence is obtained, allowing to calculate the maximal magnitude of the torque from design parameters of the disk asynchronous motor.

Keywords: disk asynchronous motor, magnetic induction, ring rotor.

1. Вступление

Существует достаточно много приборов и машин, рабочие органы которых имеют форму плоского кольца, вращающегося вокруг оси симметрии. Примерами могут служить роторы гироскопов, рабочие колеса динамических насосов, дисковые пилы обрабатывающих станков. Традиционно, кольцевой рабочий орган (**КРО**) приводится во вращение и удерживается в пространстве, а также воспринимает полезные нагрузки и силы сопротивлений посредством шпиндельного узла или вала. Последний получает вращение от отдельного электродвигателя и, в большинстве случаев, через промежуточную передачу.

Сокращение количества вращающихся деталей, повышение надежности при снижении себестои-

мости машины, уменьшение ее массы и энергопотребления могут быть достигнуты путем бесконтактной (без механической связи) передачи крутящего момента и стабилизирующих сил непосредственно на КРО [1]. В этом случае исключаются механические опоры в виде узлов подшипников и приводной вал, что упрощает конструкцию. Сам рабочий орган становится вторичным элементом специальной электрической машины [2].

2. Конструктивные особенности торцевых асинхронных двигателей

В настоящее время асинхронные двигатели цилиндрического исполнения являются наиболее применяемыми, в силу простоты своей конструкции, технологичности, благодаря существ-

вующему массовому производству их и, как следствие, малой цены. Решение о масштабном промышленном освоении новых электрических машин принимается по условию использования в новом производстве существующей технологии, то есть на первое место выдвигается требование неперенной технологической преемственности [3].

Однако непрерывный рост требований к массогабаритным характеристикам электродвигателей не позволяет в ряде случаев применить двигатели цилиндрического исполнения, в том числе и для машин с прямым приводом. В некоторых случаях применение торцевых двигателей является наиболее целесообразным.

На рис. 1 показаны схемы стиральной машины и вентилятора [4]. Видно, что применение торцевого двигателя обеспечивает существенный выигрыш по занимаемому пространству за счет приближения электродвигателя к рабочему механизму, то есть при объединении конструктивных схем механизма и приводного электродвигателя. Малая осевая длина торцевых двигателей дает возможность обеспечить конструктивную совместимость их с рядом механизмов, компактность, удобство сборки и эксплуатации.

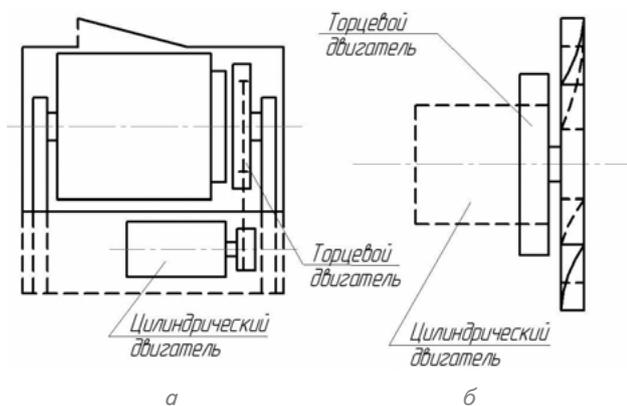


Рис. 1. Применение торцевых асинхронных двигателей в электробытовых устройствах: а — стиральной машине; б — вентиляторе

Примером реальной машины может служить центробежный прямоточный электровентилятор [4], схема которого показана на рис. 2. Рабочее колесо вентилятора 2 крепится непосредственно к ротору двигателя 1. Двигатель 1 посредством спрямляющих лопаток 3 установлен в корпусе 5 и охлаждается нагнетаемым через направляющий кожух 4 потоком газа.

Использование торцевого двигателя в центробежном прямоточном вентиляторе уже упрощает конструкцию и уменьшает его габаритные размеры. Однако дальнейшим резервом повышения эффективности конструкции является совмещение функций рабочего колеса и вторичного элемента электрической машины [1]. Этот принцип реали-

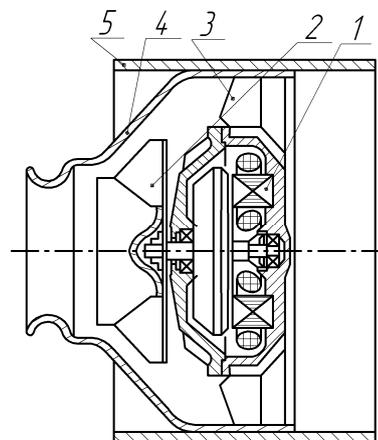


Рис. 2. Центробежный прямоточный электровентилятор 1 — двигатель; 2 — рабочее колесо; 3 — спрямляющие лопатки; 4 — направляющий кожух; 5 — корпус вентилятора

зуется путем передачи вращающего момента на ротор и удержании его в пространстве за счет сил вращающегося магнитного поля. Основная идея создания машин с прямым приводом без механических опор изложена нами в [2].

Так как КРО такой машины непосредственно взаимодействует с рабочей средой, например, является рабочим колесом центробежного насоса, то он не содержит обмотки. По этому ротор должен быть изготовлен из пара- или диамагнитного материала (чаще всего из алюминия или меди). Для уменьшения магнитного сопротивления машины КРО помещается в рабочем зазоре между двумя статорами или статором и дополнительным магнитопроводом. Тем самым реализуется конструктивная схема характерная для дискового асинхронного двигателя (ДАД) [5].

3. Цель и постановка задач

Основным параметром ДАД является вращающий момент, создаваемый электромагнитными силами. В зависимости от назначения машины кольцевой ротор может иметь различную форму и размеры. От толщины ротора зависит величина рабочего зазора ДАД, что оказывает непосредственное влияние на вращающий момент электрического двигателя.

Целью работы является получение максимального вращающего момента ДАД с двумя статорами за счет оптимизации толщины ротора.

Для реализации поставленной цели были решены следующие задачи:

- ➔ проведено измерение величины магнитной индукции в рабочем зазоре ДАД в функции от толщины ротора;
- ➔ проведен анализ зависимости вращающего момента от величин магнитной индукции и толщины ротора;
- ➔ проведена оптимизация толщины ротора.

4. Решение задачи

В работе [6] показано, что если центр масс кольцевого ротора совпадает с центром осевой симметрии статора ДАД, то вращающий момент определяется выражениями:

$$M_{\sigma\tau} = \frac{\pi(\omega_C - \omega_P)}{8\rho_{уд}} \delta B^2 (R_{PH}^4 - R_{PB}^4) \sin \phi, \quad (1)$$

где B — магнитная индукция, Тл; R_{PH} и R_{PB} — наружный и внутренний радиусы кольцевого ротора, м; ϕ — угол, определяемый положением паза индуктора, рад; ω_C — угловая скорость вращения магнитного поля статора, c^{-1} ; ω_P — угловая скорость вращения ротора, c^{-1} ; $\rho_{уд}$ — удельное сопротивление материала ротора, Ом · м; δ — толщина кольцевого ротора, м.

Как видно из выражений (1) на вращающий момент кольцевого ротора оказывают непосредственное влияние величина магнитной индукции B и толщина ротора δ . Так как сопротивление ротора обратно пропорционально его толщине δ , то с увеличением δ в соответствии с (1), вращающий момент растет, но увеличение толщины ротора приводит к росту рабочего зазора ДАД и, как следствие, к уменьшению магнитной индукции B . Согласно выражению (1), вращающий момент пропорционален квадрату B и с уменьшением ее величины должен снижаться.

Для определения совместного влияния толщины ротора и величины магнитной индукции в рабочем зазоре была изготовлена экспериментальная установка, схема которой представлена на рис. 3. Она включает в себя: нижний статор 1, установленный на основании 2 и верхний статор 3, закрепленный на плите 4. Нижний 1 и верхний 3 статоры оснащены трехфазными обмотками, которые создают вращающееся магнитное поле. В рабочий зазор между статорами помещается кольцевой ротор 5, который под действием магнитного поля удерживается в пространстве и приводится во вращательное движение. Зазор между индукторами устанавливается в пределах от нуля до 60 мм с помощью регулируемых стоек 6 и комплекта гаек 7.

Принципиальная схема трехфазной обмотки приведена на рис. 4. Обмотка является распределенной двухслойной с укороченным шагом.

Так как в изготовленной установке величина воздушных зазоров, отделяющих ротор от поверхности статоров, мала по сравнению с его толщи-

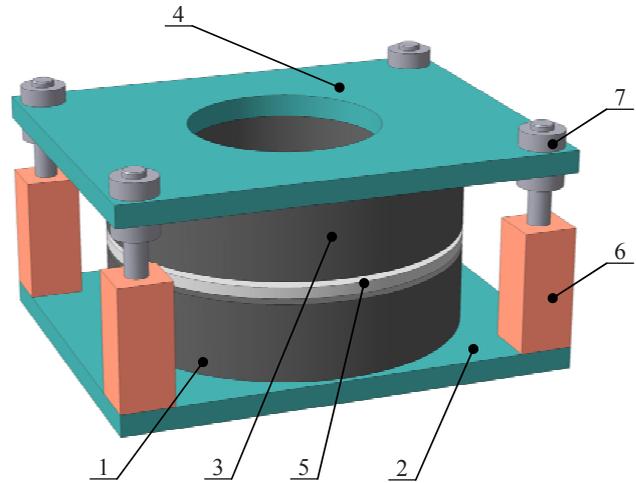


Рис. 3. Схема экспериментальной установки
1 — нижний статор; 2 — основание; 3 — верхний статор; 4 — плита; 5 — датчик; 6 — стойки; 7 — комплекта гаек

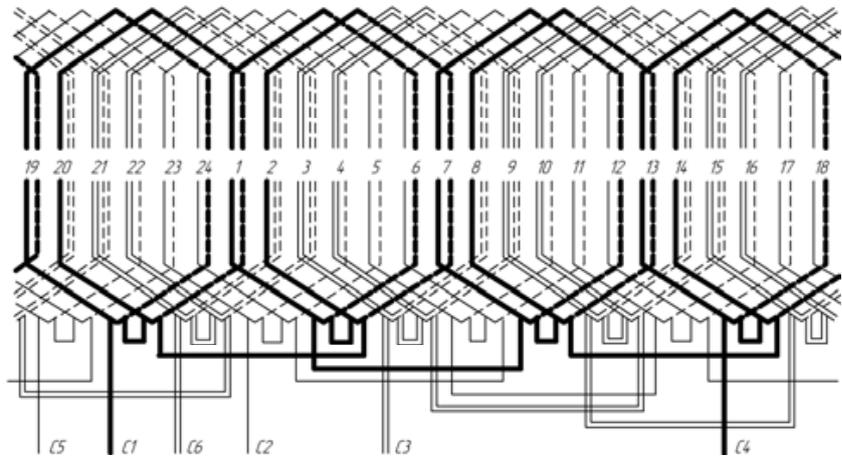


Рис. 4. Схема трехфазной обмотки

ной δ , то можно считать, что ротор занимает все пространство рабочего зазора. В таком случае величина рабочего зазора будет равна δ .

На основании того, что величины относительной магнитной проницаемости алюминиевого ротора и воздуха имеют один и тот же порядок, полагаем, что ротор не оказывает существенного влияния на величину магнитной индукции в рабочем зазоре ДАД. Поэтому для измерения величины магнитной индукции вместо ротора в рабочий зазор ДАД (см. рис. 1) помещается датчик, схема которого представлена на рис. 5. Датчик состоит из катушки 1, витки которой расположены в плоскости основания 2. Параметры катушки следующие: $R_B = 20$ мм, $R_H = 25,5$ мм, $L = 30$ мм и количество витков $n = 25$. Ее выводы 3 подключены к вольтметру 4. Под действием переменного магнитного поля в датчике возникает ЭДС, которую регистрирует вольтметр.

Потокоцепление ψ для плоской катушки вычисляется по формуле:

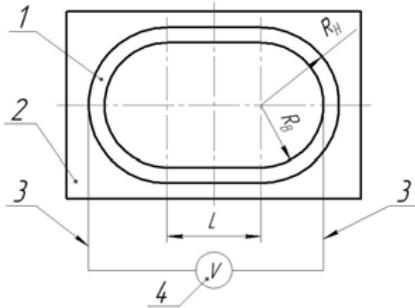


Рис. 5. Схема датчика

1 — катушка; 2 — подложка; 3 — выводы катушки; 4 — вольтметр

$$\Psi = \sum_{i=1}^n \Phi_i \quad (2)$$

или

$$\Psi = \sum_{i=1}^n BS_i \cos \alpha, \quad (3)$$

где Φ_i — магнитный поток, через i -й виток, Вб; S_i — площадь i -го витка, м²; n — число витков; α — угол между вектором B и нормалью к плоскости витка, в данном случае $\alpha = 0^\circ$.

Суммарную площадь витков можно представить в следующем виде:

$$\sum_{i=1}^n S_i = n \cdot (\pi R_{cp}^2 + 2R_{cp}L), \quad (4)$$

где $R_{cp} = \frac{1}{2}(R_B + R_H)$.

Выполнив преобразования над (3) и (4) получим:

$$\Psi = nB(R_B + R_H)\left(\pi \frac{R_B + R_H}{4} + L\right). \quad (5)$$

Полагаем, что индуцированная в датчике ЭДС изменяется по гармоническому закону, то есть: $\varepsilon = \sqrt{2}E \sin(\omega t)$, где E — действующее значение ЭДС, В; ω — угловая частота напряжения в питающей цепи, с⁻¹; t — текущее время, с. Зная что $\varepsilon = -\frac{d\Psi}{dt}$, можно найти максимальное значение величины потокосцепления:

$$\Psi = \frac{\sqrt{2}E}{\omega}. \quad (6)$$

Приравняв выражения (5) и (6) и выполнив соответствующие преобразования, получим:

$$B = \frac{\sqrt{2}E}{\omega \cdot n(R_B + R_H)\left(\pi \frac{R_B + R_H}{4} + L\right)}. \quad (7)$$

С учетом конкретных размеров датчика и частоты питающей сети, выражение (7) примет вид:

$$B = 6 \cdot 10^{-2} E. \quad (8)$$

Значения ЭДС индукции E измеряем при различных величинах зазора δ и наносим на график рис. 6.

Данная последовательность повторяется пять раз, и проводится усреднение результатов.

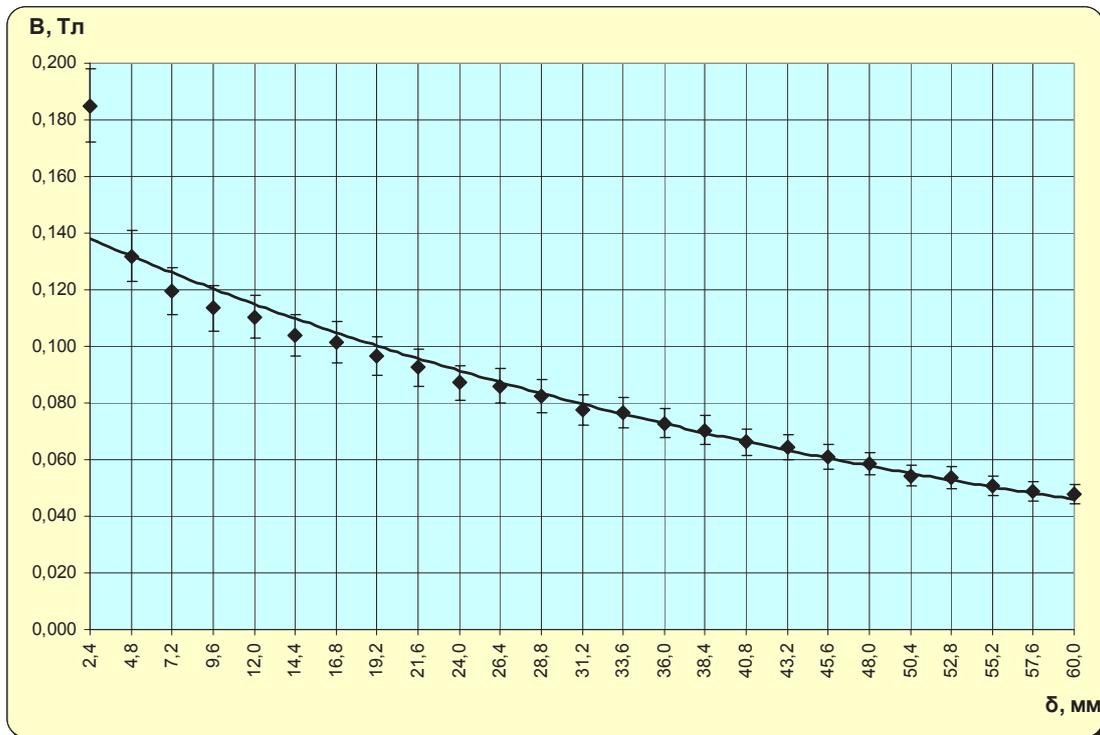


Рис. 6. Зависимость магнитной индукции от величины рабочего зазора

Полученные данные аппроксимированы экспоненциальной функцией вида:

$$B = B_0 e^{-a\delta}, \quad (9)$$

где B_0 – начальное значение магнитной индукции при $\delta=0$, Тл; a – коэффициент, определяющий интенсивность уменьшения магнитной индукции в рабочем зазоре, мм⁻¹.

В результате аппроксимации функция (9) имеет вид:

$$B = 0,144e^{-0,0191\delta}. \quad (10)$$

Функция (10) показана на графике рис. 6 сплошной линией. Из графика видно, что величина магнитной индукции с увеличением рабочего зазора асимптотично уменьшается, и при больших его значениях будет стремиться к нулю.

Выражение (1) можно записать в следующем виде:

$$M_{от} = KB^2\delta, \quad (11)$$

$$\text{где } K = \frac{\pi(\omega_C - \omega_P)}{8\rho_{уд}}(R_{PH}^4 - R_{PB}^4)\sin\phi.$$

Подставим выражение (9) в формулу (11):

$$M_{от} = KB_0^2\delta e^{-2a\delta}. \quad (12)$$

После подстановки численных значений для B_0 и a получим:

$$M_{от} = 0,0207K\delta e^{-0,0021\delta}. \quad (13)$$

Выражение (13) является основным для построения функциональной зависимости. Коэффициент K для данного случая является константой

и не оказывает качественного влияния на характер изменения функции $M_{от} = f(\delta)$, которая представлена на рис. 7.

Из графика (рис. 7) видно, что вращающий момент с увеличением толщины ротора, быстро возрастает до максимальной величины, а при дальнейшем увеличении толщины, происходит более медленное уменьшение его значения. Начальное повышение момента объясняется тем, что с увеличением δ уменьшается сопротивление ротора (см. (1)). Однако, согласно рис. 6, с ростом δ магнитная индукция в рабочем зазоре убывает, а так как вращающий момент пропорционален B^2 , то с уменьшением ее величины он будет интенсивно снижаться. Одновременное изменение сопротивления ротора и магнитной индукции приводят к наличию максимума в функциональной зависимости вращающего момента от толщины ротора.

Найдем толщину ротора δ_0 соответствующую экстремуму функции (12). Для чего вычислим ее первую производную $\frac{dM_{от}}{d\delta}$ и приравняем найденное выражение нулю. Решив уравнение $\frac{dM_{от}}{d\delta} = 0$ относительно δ , получим искомое выражение:

$$\delta_0 = \frac{1}{2a}. \quad (14)$$

Выражение (14) определяет оптимальную величину толщины ротора. Она обратно пропорциональна a , то есть зависит только от распределения магнитной индукции в рабочем зазоре ДАД.

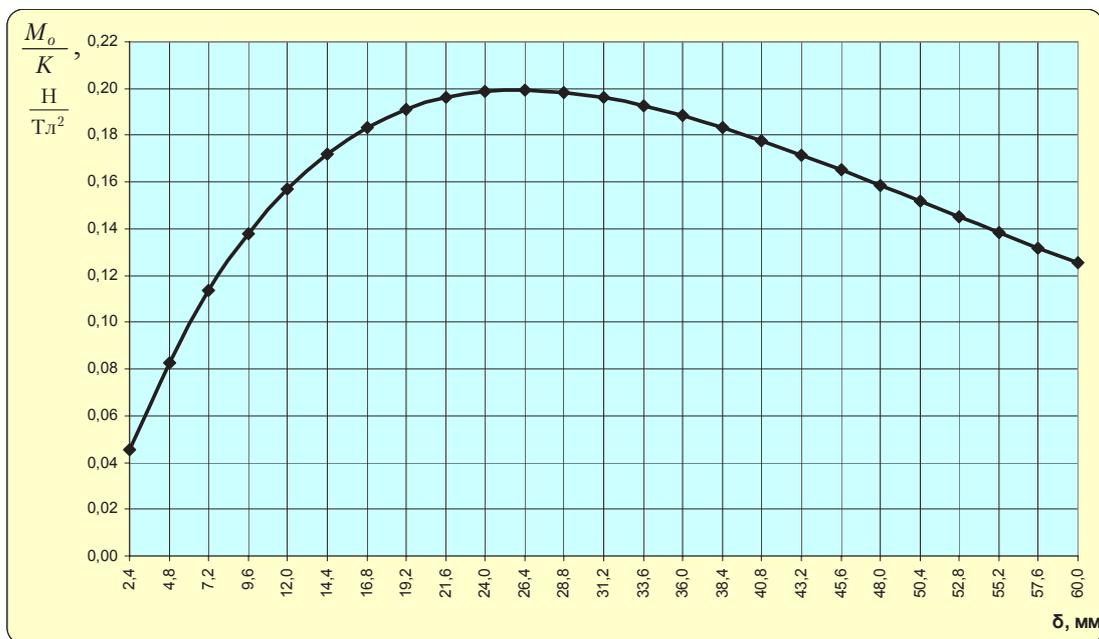


Рис. 7. График зависимости отношения $\frac{M_{от}}{K}$ от толщины ротора

Для определения максимального вращающего момента $M_{от}^{\max}$ выражение (14) подставим в формулу (12) и получим:

$$M_{от}^{\max} = \frac{KB_0^2}{2ae}. \quad (15)$$

Как видно из (15), $M_{от}^{\max}$ прямо пропорционален квадрату магнитной индукции B_0 и обратно пропорциональны a .

Для подтверждения экстремального характера зависимости $M_{от} = f(\delta)$ в ДАД помещались кольцевые роторы различной толщины. При этом величина рабочего зазора задавалась таким образом, чтобы обеспечивались минимально возможные воздушные зазоры, отделяющие ротор от поверхности статоров. Роторы ДАД при прочих равных условиях приводились во вращательное движение. При этом определялась предельная частота вращения. Серия экспериментов повторялась при следующих частотах питающей сети: 10 Гц, 20 Гц, 30 Гц и 40 Гц. Усредненные экспериментальные данные представлены в графическом виде на рис. 8. Так как в установившемся режиме вращения силы сопротивления, действующие на ротор, уравновешиваются вращающим моментом, то характер изменения $n = f(\delta)$ будет аналогичен $M_{от} = f(\delta)$.

Из рис. 8 видно, что функциональные зависимости $n = f(\delta)$ имеют одинаковый характер. Для всех кривых характерно то, что с ростом толщины ротора, его частота вращения возрастает до максимального значения, а затем уменьшается. Этот факт подтверждает наличие максимума функции $M_{от} = f(\delta)$. Следовательно, выбор оп-

тимальной толщины ротора позволит улучшить механические характеристики ДАД.

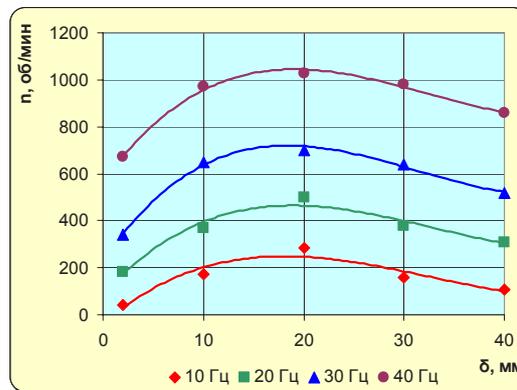


Рис. 8. Зависимость предельной частоты вращения роторов от толщины δ

5. Выводы

1. На основании экспериментальных исследований величины магнитной индукции B от толщины ротора δ и расчета вращающего момента $M_{от}$ установлено, что зависимость $M_{от} = f(\delta)$ имеет максимум. При малых δ значение градиента функции $M_{от}$ велико, то есть зависимость критична к изменению толщины ротора. После перехода через максимум, скорость изменения функции $M_{от} = f(\delta)$ уменьшается. Она асимптотически убывает.

2. Получена аналитическая зависимость, позволяющая рассчитать максимальную величину вращающего момента $M_{от}$ от конструктивных параметров дискового асинхронного двигателя.

Литература

1. Ерошин, С. С. Повышение эффективности машин применением рабочих органов без механических опор [Текст] / С. С. Ерошин, В. Е. Брешев // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2005. — № 5(17). — С. 82–85.
2. Ерошин, С. С. Концепція створення машин і приладів з прямим приводом робочих органів без механічних опор [Текст] / С. С. Ерошин // Машинознавство. — ISSN 1729-4959. — 2007. — № 2(116). — С. 27–32.
3. Технология производства асинхронных двигателей (специальные процессы) [Текст] / под ред. В. Г. Костромина. — М.: Энергоатомиздат, 1981.
4. Игнатов, В. А. Торцевые асинхронные электродвигатели интегрального изготовления [Текст] / В. А. Игнатов, К. Я. Вильданов. — М.: Энергоатомиздат, 1988. — 304 с: ил.
5. Копылов, И. П. Тороидальные двигатели [Текст] / И. П. Копылов, Ю. С. Маринин. — М.: «Энергия», 1971. — 96 с.
6. Ерошин, С. С. Определение сил, действующих на кольцевую пластинку, находящуюся во вращающемся магнитном поле [Текст] / С. С. Ерошин // Збірник наукових праць Східноукраїнського державного університету. Серія Машинобудування. — Видавництво СУДУ. — Луганськ 1998. — С. 13–21.