

3. В целях повышения координатной точности электропривода, реализующего фазовый способ возбуждения прерывистого закона движе-

ния, рекомендовано выполнять его по принципу синхронизации с частотой сети.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Луковников В.И. Электропривод колебательного движения. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.
2. Способы управления фазами шагового двигателя. URL: <http://electroprivod.ru/microstep.htm> (дата обращения: 10.01.2013).
3. Аристов А.В., Воронина Н.А. Рабочие характеристики электропривода колебательного движения в режиме прерывистого перемещения // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 314. – № 4. – С. 64–68.
4. Аристов А.В. Электропривод колебательного движения в режиме прерывистого перемещения // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 313. – № 4. – С. 107–109.

Поступила 01.02.2013 г.

УДК 621.313.13:621.396.677

## ВЕНТИЛЬНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ ДЛЯ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА РАДИОЛОКАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ

Р.П. Клабуков\*, О.П. Муравлев

Томский политехнический университет  
\*ОАО «Томский электротехнический завод»  
E-mail: RomanFlesh@sibmail.com

*Поставлена задача исследования факторов, влияющих на быстродействие вентильного двигателя с постоянными магнитами. Предложены рекомендации по снижению электромеханической постоянной времени. Получены зависимости момента инерции и объёма ротора от выбора магнитов с более высокими энергетическими показателями. Представлен результат расчёта магнитных потерь статорного сердечника.*

#### Ключевые слова:

*Вентильный двигатель, электромеханическая постоянная времени, быстродействие, беспазовая обмотка.*

#### Key words:

*Thyatron motor, electromechanical time constant, fast acting, the pitchless winding.*

Электрический привод с вентильным электро-двигателем с возбуждением от постоянных магнитов (ВДПМ) является на сегодня одним из самых перспективных приводов. Это объясняется его высокой перегрузочной способностью благодаря использованию редкоземельных магнитов, большой гибкостью, возможностью построения быстродействующих систем управления, хорошими регулировочными свойствами, разнообразием конструкций и схем, большим сроком службы и высокой надёжностью. Применение подобных двигателей позволяет создать быстродействующие электроприводы, обеспечивающие повышение производительности и точности специальных устройств. Весьма перспективно использование малоинерционных двигателей в приводах радиолокационных устройств (РЛУ), главным образом следящих системах.

Целью данной работы является учёт особенностей вентильного двигателя с постоянными магнитами для быстродействующего электропривода радиолокационных устройств и исследование факторов, влияющих на его быстродействие.

Требование максимального быстродействия устройств автоматики обусловило необходимость разработки исполнительных двигателей с малым моментом инерции вращающихся частей. Для этого электрическая машина заданной мощности проектируется с максимально допустимой по механической устойчивости длиной якоря при минимальном его диаметре [1].

В различных РЛУ необходимо быстрое изменение значения или направления скорости движения исполнительного органа, что требует от приводного двигателя обеспечения значительных ускорений или замедлений вращения вала, что может быть обеспечено его высоким быстродействием [2].

Реализация более высокого быстродействия вентильных двигателей заключается в выполнении ротора двигателя с минимально возможной массой и с максимально возможным отношением длины к радиусу, а так же соответствующего расчёта магнитной системы.

При проектировании быстродействующих систем важнейшим показателем качества является время отработки управляющего воздействия.

В этом смысле проектирование ВДПМ на максимум быстродействия эквивалентно проектированию двигателя с минимально возможным значением электромагнитической постоянной времени, достигаемым при затратах единицы потребляемой мощности в единице массы [2].

Для электромагнитической постоянной времени электродвигателя справедливо выражение:

$$T_m = \frac{J\omega_0}{M_k}, \quad (1)$$

где  $J$  – момент инерции ротора, кг·м<sup>2</sup>;  $\omega_0$  – скорость вращения идеального холостого хода, рад/с;  $M_k$  – пусковой момент, Н·м.

Ввиду повышенных требований к быстродействию проектируемого ВДПМ и высокой частоты вращения ротора с постоянными магнитами предполагается компактное конструктивное исполнение ротора со сравнительно малым диаметром. В этом случае можно в первом приближении представить ротор массивным однородным цилиндром диаметра  $D$  и длиной  $l$  с удельной массой  $\gamma$ , его момент инерции [3]:

$$J = \frac{m}{8} D^2, \quad (2)$$

где масса ротора

$$m = \frac{\pi\gamma}{4} D^2 l. \quad (3)$$

После подстановки (2), (3) в (1) получим:

$$T_m = \frac{\pi}{32} \frac{\gamma k_x \omega_H^2}{k_{nm} P_H} D^2 l, \quad (4)$$

где  $k_x = \omega_0 / \omega_H$  – отношение скорости идеального холостого хода к номинальной;  $k_{nm} = M_k / M_H$  – кратность пускового момента;  $M_H$  – номинальный момент, Н·м;  $P_H$  – номинальная мощность электродвигателя, Вт.

Главные размеры  $D$  и  $l$  электродвигателя связаны с мощностью  $P_H$  и угловой скоростью  $\omega_H$  через машинную постоянную  $C_A$  [4]:

$$D^2 l = C_A \frac{P_H k_E}{\omega_H \eta_H \cos \varphi_H}, \quad (5)$$

$$C_A = \frac{2}{\pi \alpha_\delta k_B k_{o6} A B_\delta}, \quad (6)$$

где  $A$  – линейная нагрузка, А/м;  $B_\delta$  – максимальное значение магнитной индукции в воздушном зазоре, Тл;  $\alpha_\delta = b_\delta / \tau$  – коэффициент полюсного перекрытия;  $k_B$  – коэффициент формы поля;  $k_{o6}$  – обмоточный коэффициент;  $k_E$  – отношение ЭДС обмотки статора к номинальному напряжению;  $\eta_H$  – номинальные КПД;  $\cos \varphi_H$  – коэффициент мощности двигателя.

Если подставить выражение (5) для  $D^2 l$  в (4), то с учетом (6) получим

$$T_m = \frac{\gamma}{16} \frac{k_x k_E}{\alpha_\delta k_B k_{o6} \eta_H \cos \varphi_H k_{nm} A B_\delta} \omega_H, \quad (7)$$

Формула (7) указывает возможные способы снижения электромагнитической постоянной: увеличение электромагнитных нагрузок; магнитной индукции в воздушном зазоре  $B_\delta$  и линейной нагрузки  $A$ . Для проектируемого ВДПМ расчётные главные размеры  $D=0,06$  м;  $l=0,193$  м получены при  $B_\delta=0,6$  Тл;  $A=450 \cdot 10^2$  А/м [5].

Увеличение индукции до 0,7 Тл за счет выбора более высокоэнергетических магнитов и большей толщины позволит уменьшить  $T_m$  в 1,17 раза. Также увеличение линейной токовой нагрузки за счет интенсификации охлаждения двигателя (у асинхронных тяговых двигателей этот параметр может превышать  $600 \cdot 10^2$  А/м) позволит уменьшить постоянную времени в 1,3 раза. Предполагая, что радиальная толщина магнитов составит 8 мм, ширина бандажного кольца 1 мм, диаметр вала 37 мм (как у асинхронных двигателей с аналогичным значением номинального момента), принимаем наружный диаметр ротора  $D=56$  мм. Согласно (7) это приведёт к уменьшению  $T_m$  примерно в 1,15 раза. В сумме перечисленные способы позволят снизить электромагнитическую постоянную примерно в 1,75 раза.

Таким образом, можно сделать вывод, что при реализации всех предложенных способов, при  $T_m=0,05$  с, возможно уменьшить кратность пускового момента с 10 до значения  $k_{nm}=10/1,75 \approx 5,7$  [6].

На быстродействие ВДПМ значительное влияние оказывает так же и конструктивное исполнение статора – пазовое или беспазовое. ВДПМ с беспазовым статором обладают рядом достоинств:

- технологичность беззубцового пакета статора;
- отсутствие зубцовых пульсаций магнитного потока и вызванных им пульсаций момента, более высокая плавность хода и глубина регулирования;
- снижение индуктивного сопротивления обмотки за счет отсутствия индуктивности от потоков пазового рассеяния, а также снижение электромагнитной постоянной времени  $T_\delta$  в 1,5–3 раза;
- оптимальное использование свойств высококоэрцитивных постоянных магнитов за счёт увеличения эквивалентного немагнитного зазора.

ВДПМ с пазовой обмоткой статора имеют сравнительно большой уровень (до  $0,1 M_H$ ) остаточного электромагнитного момента реактивного происхождения. Этот недостаток затрудняет их использование в высокоточных электроприводах различных РЛУ. Зубчатость сердечника статора вызывает, кроме того, пульсации магнитной индукции на холостом ходу в массиве постоянных магнитов, что является причиной их недопустимого нагрева. Средство борьбы с этим недостатком – разбиение магнита по длине на отдельные участки. Следует отметить, что при отсутствии зубцов статора диаметр ротора может возрасти, что приведет при прочих равных условиях к увеличению электромагнитного момента, не будет и повышенных магнитных потерь в зубцах, что позволит увеличить номиналь-

ный ток двигателя. Однако очевидное снижение магнитной индукции в воздушном зазоре при этом типе обмотки статора может ухудшить использование двигателя. При этом расположение обмотки в расточке беспазового статора ВДПМ приводит к увеличению немагнитного зазора. Обеспечение необходимого потока в воздушном зазоре требует увеличения объема магнитов и приводит к увеличению момента инерции ротора и ухудшению динамических характеристик. Беспазовая обмотка, расположенная в воздушном зазоре в зоне максимальных индукций, требует разделения провода на элементарные проводники с целью уменьшения дополнительных потерь в меди от вихревых токов.

При поиске вариантов ВДПМ за основу была принята математическая модель, которая представляет собой ряд уравнений, связывающих исходные данные, независимые и зависимые параметры. Уравнения записаны на базе теории электрических, магнитных и тепловых сетей. Модель предназначена для оптимизационных расчётов ВДПМ различных конструктивных схем [7].

В соответствии с предложенной моделью электромагнитный момент ВДПМ

$$M_{\text{э}} = apj\Phi Q_0,$$

где  $a$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от конструктивной схемы ВДПМ, числа фаз и схемы соединения обмоток якоря;  $p$  – число пар полюсов индуктора;  $\Phi$  – магнитный поток в рабочем зазоре;  $Q_0$  – площадь сечения якоря, занятая обмоткой;  $j$  – плотность тока в обмотке якоря;

Магнитный поток в рабочем зазоре ВД можно определить:

$$\Phi = \frac{B_r \frac{\pi \alpha_i \lambda D_{\text{и.р}}^{*2} D_{\text{я.р}}^* (1 - F_{\text{адН}}^*) D_{\text{баз}}^2}{2p}}{\mu_B^* k_{\mu} \delta_p^* / h_{\text{м.р}}^{*1} + k_{\sigma} \frac{\pi \alpha_i D_{\text{я.р}}^* / b_{\text{м.р}}^*}{2p}},$$

$$F_{\text{адН}}^* = \frac{\alpha k_0 k_{\text{з.м}} j Q_0}{4 p H_c m h_{\text{м.р}}^{*1} D_{\text{и.р}}^* D_{\text{баз}}^*},$$

где  $B_r$  – остаточная индукция магнита, Тл;  $H_c$  – коэрцитивная сила магнита, А/м;  $\mu_0$  – магнитная проницаемость воздуха, Гн/м;  $\mu_B^0 = B_r / (\mu_0 H_c)$  – относительное значение коэффициента возврата кривой размагничивания;  $k_0$  – коэффициент обмотки;  $k_{\text{з.м}}$  – коэффициент заполнения индуктора магнитом;  $D_{\text{и}}$  – диаметр индуктора;  $k_{\mu}$  – коэффициент магнитной цепи;  $\lambda = l / D_{\text{и}}$  – конструктивный коэффициент;  $D_{\text{я.р}}^* = D_{\text{я.р}} / D_{\text{баз}}$  – расчётное значение диаметра якоря;  $\delta_p^* = \delta_p / D_{\text{баз}}$  – расчётное значение воздушного зазора;  $l$  – активная длина машины, м;  $\alpha_i$  – расчетный коэффициент полного перекрытия;  $k_{\sigma}$  – коэффициент рассеяния индуктора;  $m$  – число фаз обмотки якоря;  $b_{\text{м.р}}^{*1}$ ,  $h_{\text{м.р}}^{*1}$  – расчетные значения ширины магнита и высоты магнита [7].

Для оценки зависимости момента инерции и объёма ротора от выбора магнитов с более высокими энергетическими показателями пазового и беспазового ВДПМ были проведены расчеты

на базе вентильного двигателя ДВ-40 в беспазовом исполнении, при тех же условиях (рис. 1, 2).

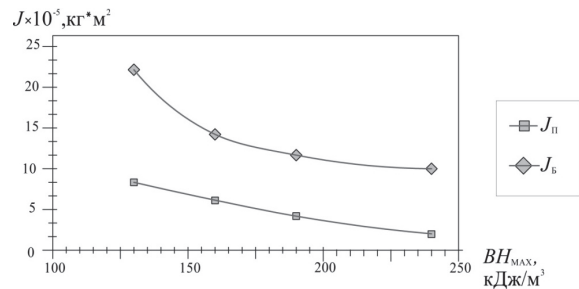


Рис. 1. Зависимость момента инерции пазовых и беспазовых ВДПМ от максимального энергетического произведения  $BH_{\text{MAX}}$

Анализ расчётов показывает, в беспазовых ВДПМ сохраняется тенденция уменьшения момента инерции и электромагнитической постоянной времени при повышении максимального энергетического произведения  $BH_{\text{MAX}}$ . Момент инерции беспазового ВДПМ по отношению к пазовой в среднем выше в 2–3 раза (рис. 1).

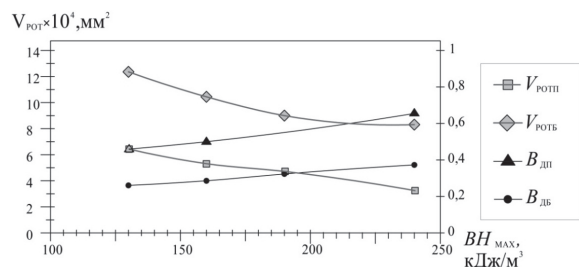


Рис. 2. Зависимость объёма ротора  $V_{\text{рот}}$  и индукции в воздушном зазоре  $B_{\delta}$  пазовых и беспазовых ВДПМ от максимального энергетического произведения  $BH_{\text{MAX}}$

Увеличенный немагнитный зазор беспазовых ВДПМ требует увеличения объёма ротора  $V_{\text{рот}}$  примерно в 2 раза по сравнению с пазовым. Индукция в воздушном зазоре беспазовых ВДПМ ниже в среднем в 1,8 раза (рис. 2).

Проектируемый двигатель имеет сравнительно большую активную длину, поэтому математически моделировать его функциональные свойства можно с достаточной точностью на основе решения плоской полевой задачи методом сопряжения конформных отображений. На рис. 3 расчетная область представлена половиной круга, являющейся периодом для магнитного поля ВДПМ, которая разбита на 54 элементарных участка (ЭУ).

Участки 1, 2, 3 относятся к яру статора, который выполнен из холоднокатаной изотропной электротехнической стали 2412. Участки 4–22 соответствуют токовому слою беспазовой петлевой двухслойной трехфазной обмотки; ЭУ 22–30 соответствуют воздушному зазору; ЭУ 31–48 относятся к бандажному стакану ротора; ЭУ 50, 52, 54 являются поперечными сечениями магнитов неодим–бор, имеющих  $B_r = 1,1$  Тл;  $H_{CB} = 750$  кА/м;  $k_a = 0,1$  (коэффициент восприимчивости по оси на-

магнитования  $\alpha$ ); ЭУ 51, 53 – межполюсные окна; ЭУ 49 – поперечное сечение ярма ротора и вала.

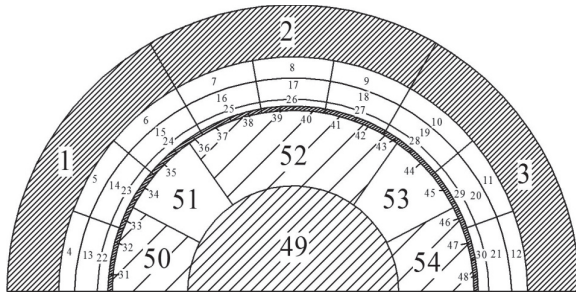


Рис. 3. Внутренняя расчётная область ВДПМ

Из рис. 3 видно, что нижняя граница участка 22 проходит по нижнему краю воздушного зазора; максимум индукции на соответствующей этому участку кривой составляет примерно 0,6 Тл.

Для расчета тепловых потерь в магнитах, бандаже ротора и сердечнике статора расчетная область двигателя была дополнена и разбита уже на 88 ЭУ. Для нахождения тепловых потерь в различных элементах конструкции ВДПМ были введены в рассмотрение виртуальные элементарные контуры (ЭК). Так, виртуальные ЭК шихтованного статорного сердечника позволяли определить магнитные потери от вихревых токов, замыкающихся поперек шихтовки. Аналогично разбивался и фрагмент бандаж. Плотность тока и магнитная проницаемость каждого ЭУ принимались равномерными. В результате были получены расчетные кривые мгновенных средних значений нормальной и тангенциальной составляющих магнитной индукции в ЭУ шихтованного статорного сердечника в режиме номинальной нагрузки. Разложение этих кривых в ряд Фурье на гармонические составляющие приведено в таблице.

Преобладающее действие первой гармоники позволяет достаточно точно определить магнитные потери в статорном сердечнике именно по этой гармонике.

Магнитные потери (на перемагничивание и гистерезис) в шихтованном статорном сердечнике от каждой из гармоник в отдельности находятся по формуле:

$$P = p_{1/400} B^2 \left( \frac{f}{400} \right)^{1,3} G \alpha,$$

где  $P$  – потери в шихтованном сердечнике, Вт;  $B$  – амплитуда соответствующей гармоники магнитной индукции, Тл;  $f$  – частота изменения магнитного потока, Гц;  $p_{1/400} = 12,5$  Вт/кг – удельные потери в электротехнической стали 1512 (Э44) толщиной 0,2 мм при  $B=1$  Тл и  $f=400$  Гц;  $G$  – масса шихто-

ванного стального массива, кг;  $\alpha=1,2$  – коэффициент, учитывающий технологические факторы (наклеп, заусеницы и др.), неравномерность магнитной индукции. По результатам расчета потери от высших гармоник индукции составляют менее 0,7 % потерь от первой гармоники [6].

Таблица. Разложение на гармонические составляющие расчётных кривых статорного сердечника ВДПМ

Номер гармоники	Амплитуда			
	Нормальной составляющей индукции (Тл) в верхнем слое (ЭУ1, 2, 3,...)	Тангенциальной составляющей индукции (Тл) в верхнем слое (ЭУ1, 2, 3,...)	Нормальной составляющей индукции (Тл) в нижнем слое (ЭУ56, 59, 62,...)	Тангенциальной составляющей индукции (Тл) в нижнем слое (ЭУ56, 59, 62,...)
1	1,5395e <sup>-001</sup>	1,5687e <sup>+000</sup>	4,6379e <sup>-001</sup>	1,7678e <sup>+000</sup>
2	6,7421e <sup>-004</sup>	1,7660e <sup>-003</sup>	8,3180e <sup>-004</sup>	5,3488e <sup>-004</sup>
3	4,9061e <sup>-004</sup>	2,9051e <sup>-003</sup>	1,3109e <sup>-002</sup>	2,7672e <sup>-002</sup>
4	4,1145e <sup>-003</sup>	9,4310e <sup>-004</sup>	2,1628e <sup>-004</sup>	2,5690e <sup>-003</sup>
5	4,1445e <sup>-003</sup>	8,8976e <sup>-003</sup>	2,6355e <sup>-003</sup>	1,4391e <sup>-003</sup>
6	5,8844e <sup>-004</sup>	9,9810e <sup>-004</sup>	8,4493e <sup>-004</sup>	2,5557e <sup>-003</sup>
7	9,4030e <sup>-004</sup>	1,9649e <sup>-003</sup>	1,7368e <sup>-003</sup>	4,3325e <sup>-003</sup>
8	8,2240e <sup>-005</sup>	1,7770e <sup>-003</sup>	2,8510e <sup>-004</sup>	2,5638e <sup>-003</sup>
9	8,4280e <sup>-005</sup>	2,5037e <sup>-002</sup>	7,2803e <sup>-004</sup>	6,1289e <sup>-003</sup>
10	6,5428e <sup>-004</sup>	7,8654e <sup>-004</sup>	9,1248e <sup>-004</sup>	2,3398e <sup>-003</sup>
11	1,6813e <sup>-003</sup>	4,5653e <sup>-003</sup>	1,7314e <sup>-003</sup>	3,7773e <sup>-003</sup>

Суммарные тепловые потери на перемагничивание и гистерезис в шихтованном статорном сердечнике от всех гармоник индукции магнитного поля составили 123,13 Вт.

**Выводы**

1. Рассмотрены особенности проектирования быстроедействующих ВДПМ, что позволило определить вид математической модели машины, необходимой для привода радиолокационных устройств.
2. Предложены рекомендации по проектированию магнитной системы и выбору размеров ротора, обеспечивающих снижение электрохимической постоянной времени до требуемого значения.
3. Использование беспазовой обмотки на статоре приводит к снижению зубцовых пульсаций магнитного потока, а следовательно и пульсаций момента на валу, что позволит добиться более высокой плавности работы ВДПМ.
4. Получены зависимости момента инерции и объёма ротора от выбора магнитов с более высокими энергетическими показателями, что в дальнейшем позволит оптимизировать проектирование ВДПМ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коков Е.Г., Жибинов А.С., Гейнц Э.Р., Цехмestрюк Г.С. Магнитное поле и ЭДС малоинерционных магнитоэлектрических машин // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320. – № 4. – С. 158–162.
2. Каган В.Г. Электроприводы с предельным быстродействием для систем воспроизведения движений. – М.: Энергия, 1985. – 192 с.
3. Кухлинг Х. Справочник по физике / пер. с нем. – М.: Мир, 1982. – 520 с.
4. Копылов И.П., Клоков Б.К., Морозкин В.П. Проектирование электрических машин / под ред. И.П. Копылова. – М.: Энергия, 2005. – 767 с.
5. Алексеев А.Е. Тяговые электрические машины и преобразователи. – Л.: Энергия, 1980. – 444 с.
6. Афанасьев А.А., Бабак А.Г., Волокитина Е.В., Головинин С.Б., Нестерин В.А., Никифоров В.Е., Николаев А.В., Чихняев В.А. Малоинерционный высокоскоростной магнитоэлектрический беспазовый вентильный двигатель // Электричество. – 2007. – № 4. – С. 28–35.
7. Куликов Н.И., Елизарова Т.А., Куликова Т.В., Сухов Д.В., Хрупачев О.Ю. Исследование и разработка быстродействующих вентильных двигателей // Электричество. – 2002. – № 5. – С. 23–32.

Поступила 29.01.2013 г.

УДК 621.313.333.2

## ОДНОФАЗНЫЙ АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ С ПОВЫШЕННЫМ ПУСКОВЫМ МОМЕНТОМ

О.С. Качин, С.И. Качин

Томский политехнический университет  
E-mail: kos@tpu.ru

*Описана конструкция однофазного асинхронного электродвигателя с повышенным пусковым моментом, рассмотрены принципы его функционирования. Предложены пути модернизации однофазных асинхронных электродвигателей в направлении снижения энергопотребления. Приведены экспериментальные механические характеристики электродвигателя предложенной конструкции в сравнении с электродвигателем стандартного исполнения. Приведены расчетные значения показателей энергоэффективности для различных вариантов исполнения однофазных асинхронных электродвигателей на базе предложенной конструкции.*

#### Ключевые слова:

*Однофазный асинхронный электродвигатель, энергоэффективность, пусковой момент, пусковая обмотка.*

#### Key words:

*Single phase induction motor, energy efficiency, starting torque, start winding.*

#### Введение

Однофазные асинхронные электродвигатели (ОАД) малой мощности широко используются в самых различных областях жизнедеятельности современного общества в составе электроприводов для различного рода устройств, питаемых от однофазной сети переменного тока. В первую очередь они получили массовое распространение благодаря использованию в бытовой технике, которая постоянно развивается, приобретает все новые функциональные возможности и интенсивно проникает в жилые и офисные помещения промышленно развитых стран. Данный класс электродвигателей относится к изделиям массового производства и выпускается десятками миллионов штук в год, что определяет повышенный интерес производителей к совершенствованию их конструкций и технологий производства. При этом в русле основных мировых тенденций последних десятилетий наблюдается устойчивое предпочтение параметра энергоэффективности электроприводов над расходами активных материалов и стоимостью их производства.

В этой связи одним из основных эксплуатационных показателей однофазных электродвигателей для бытовой техники является уровень их энергопотребления. Согласно оценкам Министерства экономического развития РФ (доклад Президиуму Госсовета РФ «О повышении энергоэффективности российской экономики») основным потенциалом снижения потребления электрической энергии в «лучших» домохозяйствах обладают холодильные компрессоры (до 50 % всего потенциала). До последнего времени задача снижения электропотребления в жилищном секторе сравнительно успешно решалась путем «импортирования энергоэффективности» из-за рубежа, путем закупки «крупных» бытовых электроприборов (в первую очередь холодильников) с повышенной энергоэффективностью. Так, например, замена устаревших конструкций холодильников на современные энергоэффективные модели может позволить сэкономить до 10 млрд кВт·ч электрической энергии по РФ в год. В связи со стратегической важностью данного показателя Министерством экономического развития РФ планируется к 2020 г. сни-