Ким К. К., Иванов С. Н.
K. K. Kim, S. N. Ivanov

**ВЛИЯНИЕ ОГРАНИЧИВАЮЩИХ ФАКТОРОВ НА ЭЛЕКТРОМАГНИТНУЮ
МОЩНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН**

**THE INFLUENCE OF LIMITING FACTORS ON ELECTRIC MACHINES
ELECTROMAGNETIC POWER**

Ким Константин Константинович – член-корреспондент АЭН РФ, член IEEE, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретические основы электротехники» Петербургского государственного университета путей сообщения (Россия, Санкт-Петербург). 190031 г. Санкт-Петербург, Московский проспект, д. 9, 8 903 096 5770. E-mail: kimkk@inbox.ru

Mr. Konstantin K. Kim – Corresponding Member of NYAS, EANS, member of IEEE, Doctor of Engineering, professor, Head of Theoretical foundations of electrical engineering Department, St. Petersburg State Railway University, 9, Moskovsky Pr. St. Petersburg, Russia. 8 903 096 5770. E-mail: kimkk@inbox.ru

Иванов Сергей Николаевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Электромеханика» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, д. 27. E-mail: isn@initkms.ru.

Mr. Sergey N. Ivanov – Doctor of Engineering, Associate Professor, professor of Electromechanics Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). 681021, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin Str. E-mail: isn@initkms.ru.

Аннотация. Рост единичной мощности электромеханических преобразователей является одним из основных направлений повышения их эффективности. В данной статье рассмотрены вопросы влияния основных электромагнитных и механических факторов на мощность, передаваемую через воздушный зазор электрических машин постоянного тока.

Summary. The increase of electromechanical transducers single capacity is one of the main ways of their efficiency upgrading. The article discusses the impact of the main electromagnetic and mechanical factors on the power, transmitted through the air gap of DC electric machines.

Ключевые слова: электромагнитная мощность, магнитная индукция, линейная токовая нагрузка, диаметр и длина якоря.

Key words: electromagnetic power, magnetic induction, linear current load, diameter and length of the rotor.

УДК 621.313

Введение. В течение длительного времени увеличение единичной (предельной) мощности электромеханических преобразователей и, в частности, электрических машин постоянного тока (МПТ) является неотъемлемой частью разработки энергетического оборудования повышенной производительности с высокими эксплуатационными свойствами.

Постановка задачи исследования. Основными проектными параметрами, рассматриваемыми в качестве факторов, ограничивающих выполнимость МПТ большой или предельной мощности, являются следующие:

- величина магнитной индукции B_δ , связанная с расчетной индукцией $B_{z\max}$ в наиболее узком сечении зубца стали якоря:

$$B_{z\max} = B_\delta \frac{t_z l_i}{b_{z\min} l_t k_{cm}},$$

где t_{z1} – величина зубцового деления статора; $b_{z\min}$ – минимальная ширина зубца; k_{cm} – коэффициент заполнения пакета сталью; l_i – длина i -го участка магнитной цепи;

- фактор нагрева (произведение линейной токовой нагрузки на плотность тока в обмотке якоря) $A_a j_a$;

- коэффициент полюсного перекрытия α_i ;

- окружные скорости на поверхности якоря v_a и коллектора v_k ;

- диаметр D_a и длина l_a якоря;

- потенциальные условия $u_k, u_{kcp}, u_{k\max}, gradu_{k\max}$;

- коммутационные напряжения $e_r, \bar{e}_r, \Delta e_r$.

Теоретический анализ. Оценку влияния отдельных параметров можно произвести на основе известного выражения для электромагнитной мощности [1; 2; 3]

$$P_g = n \alpha_i (\pi D_a)^2 l_a B_\delta A_a, \quad (1)$$

где n – частота вращения якоря.

Из выражения (1) видно, что электромагнитная мощность МПТ в заданных габаритах пропорциональна магнитной индукции B_δ , определяющей магнитное состояние зубцовой зоны. С увеличением индукции $B_{z\max}$ резко насыщается магнитная цепь, соответственно увеличивается составляющая намагничивающей силы (НС), необходимой для проведения потока в зубцовой зоне, и, как следствие, возрастает полная НС, что как минимум ведет к повышенному расходу обмоточного провода обмоток возбуждения. Одновременно увеличиваются потери в стали зубцовой зоны, пропорциональные B_{zcp}^2 . В табл. 1 приведены характеристики двух марок электротехнических сталей с толщиной листа 0,35 мм, применяемых в энергетическом машиностроении.

Таблица 1

Характеристики некоторых марок электротехнических сталей

Марка стали	Магнитная индукция B , Тл, при напряженности магнитного поля		Удельные потери, Вт/кг		Сопротивление r , мкОм·м
	1	10	$P_{1,0/50}$	$P_{1,5/50}$	
2412	Холоднокатаная изотропная сталь				
	1,35	1,95	1,15	2,5	0,5
3415	Холоднокатаная анизотропная сталь				
	1,61	2,5	0,46	1,03	0,5

Для рассматриваемых сталей индукция $B_{z\max}$ может достигать 2,8...3,0 Тл. Если количество пазов z и они имеют форму прямоугольника с высотой h_Π и шириной b_Π , можно найти минимальную ширину зубца $b_{z\min}$ и величину зубцового деления t_{z1} :

$$b_{z\min} = \frac{\pi(D_a - 2h_\Pi)}{z} - b_\Pi, \quad t_{z1} = \frac{\pi D_a}{z}.$$

Следовательно,

$$B_\delta = B_{z\max} \left(1 - \frac{2h_\Pi}{D_a} - \frac{zb_\Pi}{\pi D_a}\right) \frac{l_t}{l_i} k_{cm},$$

причем отношение $\frac{zb_\Pi}{\pi D_a} = \frac{b_\Pi}{t_{z1}}$ при изменении диаметра якоря меняется сравнительно мало,

так при увеличении D_a от 200 до 4000 мм $\frac{b_\Pi}{t_{z1}}$ возрастает от 0,40 до 0,45, в то же время от-

ношение $\frac{2h_{\Pi}}{D_a}$ уменьшается от 0,25 до 0,025, т.е. на порядок. Учитывая, что $\frac{l_l}{l_i} \leq 1$ и $k_{ст} = 0,96...0,97$, величина индукции в зазоре в рассмотренном диапазоне D_a , учитываемая в (1), составит 0,8...1,3 Тл.

Следующим ограничивающим параметром, но по условиям нагревания, является произведение линейной токовой нагрузки на плотность тока в обмотке якоря $A_a j_a$. Уже первые работы по созданию методов оценки воздействия повышенных температур на срок службы изоляционных материалов показали, что тепловое старение является основной причиной потери эластичности, появления признаков хрупкого разрыва, возникновения и развития трещин, значительного уменьшения сопротивления изоляции и электрической прочности, приводит к снижению адгезии пленок пропиточных лаков к проводам в системах изоляции, ухудшению ее стойкости к химически активным средам. Отдельного внимания требуют термомеханические нагрузки, возникающие в результате периодических нагревов и охлаждений и характеризующиеся напряжениями сжатия и растяжения в местах выхода катушек из пазов.

Тепловая мощность обмотки якоря, являющаяся источником членом в правой части уравнения теплового баланса, из которого находится установившаяся температура обмотки, в первом приближении может быть учтена формулой

$$P_{мен} = I_a^2 \rho \frac{N l_a}{4 a^2 q_a}, \quad (2)$$

где q_a – сечение эффективного проводника; ρ – удельное электрическое сопротивление.

Предельные значения температуры устанавливает ГОСТ 8865-93 «Системы электрической изоляции. Оценка нагревостойкости и классификация», методы испытаний – ГОСТ 27710-88 «Материалы электроизоляционные. Общие требования к методу испытания на нагревостойкость».

Подставляя в (2) значения тока якоря и его плотности

$$I_a = \frac{2 \pi a D_a A_a}{N}, \quad j_a = \frac{I_a}{2 a q_a},$$

получаем выражение для удельной тепловой нагрузки на поверхности якоря

$$A_a j_a = \frac{P_{мен}}{\pi D_a l_a}.$$

Величина $A_a j_a$ устанавливает связь между линейной токовой нагрузкой и плотностью тока. При больших A_a размеры машины уменьшаются, но при этом приходится снижать j_a , что приводит к увеличению расхода меди и ухудшению коммутационных условий.

Из выражения (1) видно, что увеличение коэффициента полюсного перекрытия α_i теоретически позволяет повысить использование МПТ. Однако слишком высокие значения α_i , определяемого отношением приведенной ширины полюса b_i к полюсному делению τ , отрицательно сказываются на эксплуатационных характеристиках машины из-за попадания значительной части потока главных полюсов в коммутационную зону и наведения дополнительной реактивной ЭДС в короткозамкнутой секции.

Коэффициент полюсного перекрытия составляет 0,6...0,7 для машин малой и средней мощности, 0,7...0,75 – большой.

Ограничения по механической прочности и значениям виброскорости и виброускорения вращающихся частей связаны с окружными скоростями на поверхности якоря v_a и коллектора v_k . Поскольку обычно $D_k / D_a = 0,6...0,8$, в качестве функционала выбирается окружная скорость $v_a = \pi D_a n$. Формула (1), выраженная через скорость v_a , показывает, что при за-

данных электромагнитных нагрузках и допустимой скорости v_a мощность $P_g \equiv n^{-1}$. Другими словами, большая мощность P_g может быть получена только на меньших частотах вращения.

Диаметр D_a и длина l_a якоря не только определяют мощность МПТ, но и являются габаритными ограничениями ее выполнимости, включая коммутационные условия, смещение упругой линии вала, предельные вибрационные ускорения и т.д. Приемлемая длина вращающейся части МПТ в одноякорном исполнении, как правило, не превышает 2000 мм, диаметр якоря – 4000 мм. Однако даже эти величины зачастую являются недопустимыми из-за потенциальных и коммутационных ограничений.

Потенциальные условия представляют одно из самых жестких ограничений коллекторных машин независимо от рода тока. В качестве основных критериев рассматриваются величины $u_k, u_{kcp}, u_{kmax}, gradu_{kmax}$, соответственно представляющие напряжение между соседними пластинами, его среднее и максимальное значения и отношение u_{kmax}/t_k . Вследствие возможного перекрытия изоляционного промежутка между смежными элементами величина $u_{kmax} \leq 30$ В, а наличие увеличенного зазора под краями полюсов дополнительно ограничивает значение напряжения $u_{kcp} \leq 16...18$ В. Градиент $gradu_{kmax} = u_{kmax}/t_k$ характеризует вероятность возникновения одного из самых тяжелых повреждений МПТ – «кругового огня» и приводит к необходимости выбора $t_k \geq 4...5$ мм.

Следующее и еще более серьезное ограничение электромагнитной мощности МПТ связано с величиной средней реактивной ЭДС в коммутируемой секции $\bar{e}_r$, рассчитываемой по формуле Пихельмайера

$$\bar{e}_r = 2w_c l_a v_a A_a \xi,$$

где w_c – число витков в секции; ξ – средняя удельная эквивалентная магнитная проводимость коммутируемых секций потокам само- и взаимоиндукции ($3,5...4,5 \times 10^{-6}$ Гн/м).

Допустимые значения $\bar{e}_r \leq 7...10$ В для машин большой мощности и $\bar{e}_r \leq 2...3$ В для малой и средней.

Подстановка последнего выражения в (1) позволяет установить зависимость электромагнитной мощности от $\bar{e}_r$

$$P_g = 0,5\pi\alpha_i \bar{e}_r \frac{D_a}{w_c \xi}.$$

Из него видно, что для повышения электромагнитной мощности необходимо выбрать $w_c = 1$. Если в полученную формулу ввести частоту вращения (об/мин)

$$P_g = \frac{30v_a}{nw_c \xi} \alpha_i \bar{e}_r B_\delta,$$

то можно установить, что зависимость предельной электромагнитной мощности от частоты вращения является гиперболической. При этом характерно, что она находится внутри зависимостей $P_g(n)$, построенных исходя из потенциальных ограничений для $\frac{a}{p} = 1$ и $\frac{a}{p} = 2$, что указывает на необходимость улучшения условий коммутации в МПТ с многоходовыми обмотками.

Рассмотренные зависимости P_g от ограничивающих факторов позволяют перейти к анализу выражения для электромагнитного момента

$$M_g \equiv \frac{P_g}{n} = 0,5\pi\alpha_i D_a^2 l_a B_\delta A_a, \quad (3)$$

которое после небольшого преобразования приводит к электромашинной постоянной Арнольда C_a :

$$C_a = \frac{D_a^2 l_a}{P_g n^{-1}} = \frac{1}{\pi^2 \alpha_i B_\delta A_a}.$$

Из полученного равенства следует, что при номинальных P_g и n размеры МПТ будут уменьшаться пропорционально снижению C_a или возрастанию электромагнитной нагрузки $\alpha_i B_\delta A_a$. Соответственно при заданных диаметре D_a и длине l_a якоря соотношение $\frac{P_g}{n}$ будет тем больше, чем меньше C_a . В практике электромашиностроения также рассматривают коэффициент, обратный C_a :

$$C = \frac{1}{C_a} = \pi^2 \alpha_i B_\delta A_a,$$

называемый коэффициентом использования или Эссона.

Следует отметить, что величина $\alpha_i B_\delta A_a$ имеет вполне определенный физический смысл. Действительно, из выражения момента (3) следует, что

$$\alpha_i B_\delta A_a = \frac{M_g}{0,5\pi D_a^2 l_a} = \sigma_T,$$

где σ_T – удельное тангенциальное (тяговое) усилие, приходящееся на единицу поверхности якоря.

Величина σ_T может использоваться для оценки сравнительной эффективности электромеханических преобразователей, подключаемых к источникам электрической энергии различной частоты. В частности, для рассматриваемых МПТ величина σ_T оказывается выше, чем у машин переменного тока приблизительно в $\sqrt{2}$ раз, т.е. использование якоря больше, что в первую очередь связано с распределением магнитной индукции B_δ и линейной токовой нагрузки A_a по его окружности.

Заключение. Представленный в статье анализ зависимости электромагнитной мощности и связанного с ней момента от основных размеров и электромагнитных нагрузок не только показывает, что рассмотренные ограничивающие факторы не только должны учитываться на этапе проектирования МПТ, но и позволяет определить пути расширения пределов их выполнимости и улучшения эксплуатационных характеристик. Полученные результаты также могут быть использованы при исследовании машин переменного тока, например, асинхронных машин с фазным ротором, коллекторных машин переменного тока, синхронных электромеханических преобразователей энергии [4].

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов-Смоленский, А. В. Электромагнитные силы и преобразование энергии в электрических машинах / А. В. Иванов-Смоленский. – М.: Высш. шк., 1989. – 312 с.
2. Иванов-Смоленский, А. В. Электрические машины / А. В. Иванов-Смоленский. – М.: Энергия, 1990. – 928 с.
3. Вольдек, А. И. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока / А. И. Вольдек, В. В. Попов. – СПб.: Питер, 2007. – 320 с.
4. Голоколос, Д. А. Энергетические соотношения в герметичных электротехнических комплексах специального назначения / Д. А. Голоколос, Г. М. Гринфельд, С. Н. Иванов // Ученые записки КнАГТУ. Науки о природе и технике. – 2014. – № III-1(19). – С. 4-10.