

ОГРАНИЧЕНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ БЕСКОНТАКТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

В. Е. Вавилов¹, Е. А. Ематин²

¹s2_88@mail.ru, ²vjeka@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Аннотация. Рассматривается проблема ограничений, связанных с различными влияниями на параметры бесконтактной электрической машины (БЭМ) с постоянными магнитами (ПМ). Проведено исследование в программном комплексе Ansoft Maxwell 14.0. Суть исследования состоит в изменении индуктивных сопротивлений по продольной и поперечной осям, описываются намагничивающая и размагничивающая реакция якоря машины и влияние этих явлений на ее эффективность. А также влияние толщины магнитов на параметры машины. Взаимосвязь ограничений, т.е. при значительном изменении параметров машины, необходимо изменение определенных узлов агрегата.

Ключевые слова: Ansoft Maxwell; БЭМ с ПМ; ограничения; параметры; толщина магнитов; ВПМ.

ВВЕДЕНИЕ

Бесконтактные электрические машины применяются в основном в автономных авиационных и космических летательных аппаратах, наземных транспортных средствах в морских судах. Их применение в данных областях можно обосновать надежностью, возможностью работы в безвоздушной среде и при больших оборотах. Конкретное применение таких электрических машин целесообразно в машинах с большим ресурсом работы и интервалом обслуживания между ТО в тяжелых условиях эксплуатации, например сельхозмашины. Также они находят свое применение в авиации. Генератор, органически объединенный с авиационным двигателем, имеет сравнительно лучшие показатели КПД относительно генератора как самостоятельного конструктивного агрегата, также имеет меньшее число конструктивных деталей и узлов, т.к. встраивается непосредственно в корпус. Ко всему прочему может применяться как стартер. БЭМ так же применяют в микротурбинных установках, таких как Capstone, Turbek T100, Elliot TA-100.

ОГРАНИЧЕНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ

При проектировании быстроходных электрических машин возникают различные ограничения, что впоследствии влияет на выбор определенных характеристик машины. Рассмотрим влияние ограничений, связанных с окружными скоростями ротора, предельной частотой вращения, максимальной электромагнитной нагрузкой, электро-механической постоянной (характеризует быстродействие машины).

Первое ограничение – это предельно допустимое значение частоты вращения n_{\max} . Оно обычно определяется в зависимости от вида подшипников, их механической прочности, нагрузок (грузоподъемности подшипников), вида смазки, срока службы, прочности ротора. При всем этом, обычно, n_{\max} обратно пропорционален сроку службы подшипника.

Использование механических подшипников возможно для достаточно высоких частот вращения. Компания GMN предоставляет механические подшипники со скоростным пределом, равным 75 000 об/мин, а компания FAG и все 170 000 об/мин, однако

лишь при условиях жидкой смазки подшипников [2]. Если необходимо обеспечить меньшие потери, большие рабочие температуры и максимальные частоты вращения вплоть до 350 000 об/мин, то приходят к необходимости использования газовых и магнитных подшипников. Газовые делятся на аэродинамические и аэростатические. Магнитные – на активные магнитные и гибридные магнитные подшипники.

Аэростатические подшипники – работают по принципу непрерывной подачи сжатого воздуха между цапфой и подшипником. Для этого им требуется наличие системы, которая будет накачивать сжатый воздух. Это является недостатком таких подшипников.

На рис. 1 приведены соотношения между мощностью и скоростью для ряда спроектированных и протестированных высокоскоростных машин.

Аэродинамические подшипники – это такой вид подшипников, в котором в случае отсутствия вращения, цапфа лежит на твердой опоре, т.е. на внутренней поверхности подшипника. Когда машина приходит во вращение, происходит самозасасывание газа из окружающей среды. В результате этого происходит создание газовой подушки, которая поднимает цапфу над твердой опорой.

Недостатком этого подшипника служат периоды запуска и остановки, т.к. в эти периоды газ не поступает, пропадает или еще не успевает появиться газовая подушка и тем самым возникают большие силы трения.

Существуют также комбинированные газовые опоры, в которых при пуске или остановке, подшипник работает как аэростатический, а при наборе определенной частоты вращения переходит в аэродинамический режим работы.

Активные магнитные подшипники устроены таким образом, чтобы удерживать ротор, исключая механический контакт за счет магнитного притяжения с использованием специальных систем обратной связи для обеспечения нужной силы магнитного притяжения. В состав этой системы входят различные датчики, источники питания, контроллеры усилители мощности. Недостатком таких подшипников является высокая стоимость и сложность конструкции, а также высокие массогабаритные характеристики.

Гибридные магнитные подшипники содержат в себе как механические, так и магнитные, и газовые. Эти подшипники считаются наиболее перспективными, т.к. имеют менее существенные недостатки по сравнению с предыдущими подшипниками.

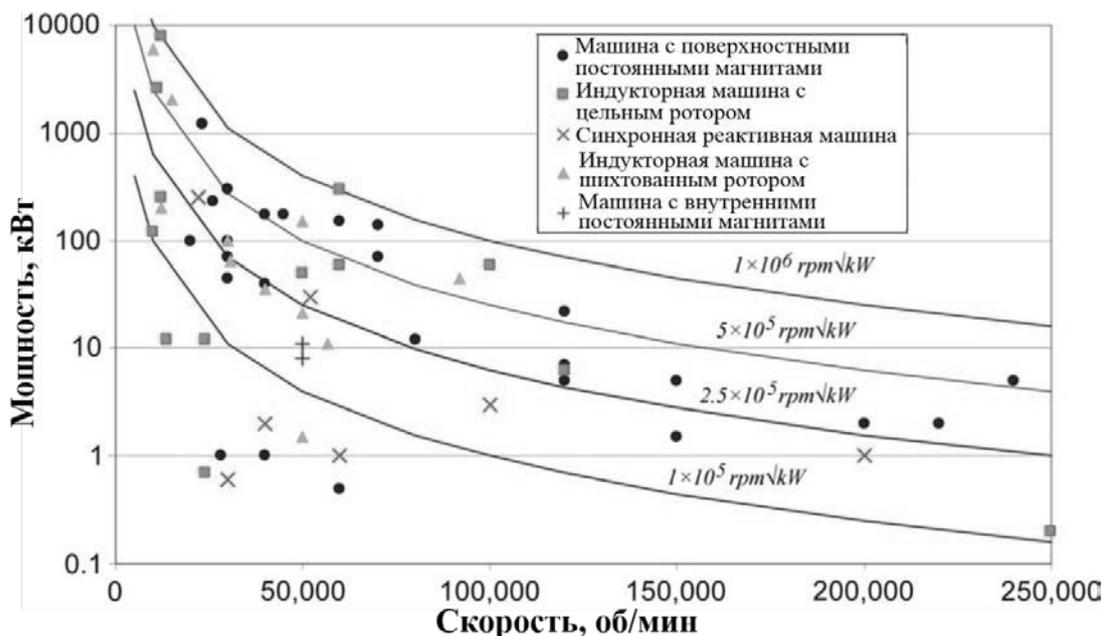


Рис. 1. Соотношения между мощностью и скоростью

Следующее ограничение – это максимальная скорость ротора v_{\max} . Она должна соответствовать прочности ротора. Посчитаем, что ротор – это сплошной цилиндр, тогда при приведении его во вращение в нем возникают механические напряжения, которые зависят от квадрата окружной скорости.

При вращении ротора, центробежные силы стремятся разрушить его, оторвав магниты от вала. Для предотвращения разрушения ротора используется бандажная оболочка, задачей последней является максимальная механическая прочность при наименьшей возможной толщине. Добиться этого позволяет использование композитных материалов, которые наматывают поверх ВПМ с определенным натягом. Также применяют цельные немагнитные гильзы из материалов, таких как титан или никел-хромовый.

В компактных БЭМ с ПМ роторы обычно снабжаются бандажами высокой прочности, и тогда выбор максимальной скорости ротора несколько упрощается, и расчет максимальной скорости происходит по формуле

$$v_{\max} = \pi D n_{\max} / 60,$$

где n_{\max} – максимальная частота вращения.

Также существует ограничение на так называемые электромагнитные нагрузки. Это ограничение оказывает влияние на выбор линейной нагрузки и магнитной индукции в зазоре машины. Таким образом, на выбор параметров машины, которые, в свою очередь, влияют на массогабаритные характеристики, т.е. обеспечивают минимальные размеры машины. Значение линейной нагрузки в первую очередь зависит от теплового режима машины и ее реакции якоря, которую можно охарактеризовать формулами, которые рассмотрели авторы [1]

$$X_{ad}^* = \frac{X_{ad}}{Z_{\text{НОМ}}} = \frac{\sqrt{2}\mu_0\tau k_0 k_{ad}}{\pi k_{\delta} k_{\mu d} \delta} \frac{A_{\text{НОМ}}}{B_{\text{НОМ}}};$$

$$X_{aq}^* = \frac{X_{aq}}{Z_{\text{НОМ}}} = \frac{\sqrt{2}\mu_0\tau k_0 k_{aq}}{\pi k_{\delta} k_{\mu q} \delta} \frac{A_{\text{НОМ}}}{B_{\text{НОМ}}}.$$

Проведем исследование в программе Ansoft Maxwell 14.0. Для этого возьмем машину, мощностью 30 кВт, и будем изменять параметр толщины магнитов при неизменной мощности и посмотрим, как изменятся основные параметры машины.

Таблица 1

Материалы используемые для создания бандажных оболочек ротора

Материал	Предел прочности на разрыв, МПа	Плотность, кг/м ³	Максимальная рабочая температура, °С
AFRP DW 152	1880	1330	<140
CFRP DW 231	2420	1520	<140
CFRP DW260	2420	1520	>300
Инконель 718	1443	8190	>700
Титан BT22	1191–1225	4600	

Таблица 2

Окончание табл. 2

Параметры машины в номинальном режиме работы	
Параметр	Значение
Число витков	24
X_{ad} , Ом	0.187086
X_{aq} , Ом	0.189705
Индуктивное сопротивление рассеяния, Ом	4.17546
Сопротивление нулевой последовательности, Ом	4.17546
Фазное сопротивление якоря, Ом	0.0460234
ЭДС, В	516.383
Линейный ток, А	45.5858
Фазный ток, А	45.5858
Термальная нагрузка якоря, A^2/mm^2	61.5237
Линейная нагрузка, А/мм	5.42716

Плотность тока, A^2/mm	11.3363
Потери в меди, Вт	286.913
Эффективность, %	98.2417
Полная мощность, кВА	30
$\cos\varphi$	0.999994
Номинальный момент, Нм	5.83252
Ток к.з., А	68.35
Максимальная мощность на выходе, кВт	44.632
Индуктивность, Гн	$3.10588 \cdot 10^{-6}$
Число проводников в пазу	2

Проведя исследование в программном комплексе Ansoft Maxwell 14.0, изучили зависимости индуктивных сопротивлений по продольной и поперечной осям от толщины магнитов машины 30 кВт и получили ряд зависимостей (рис. 2–3).

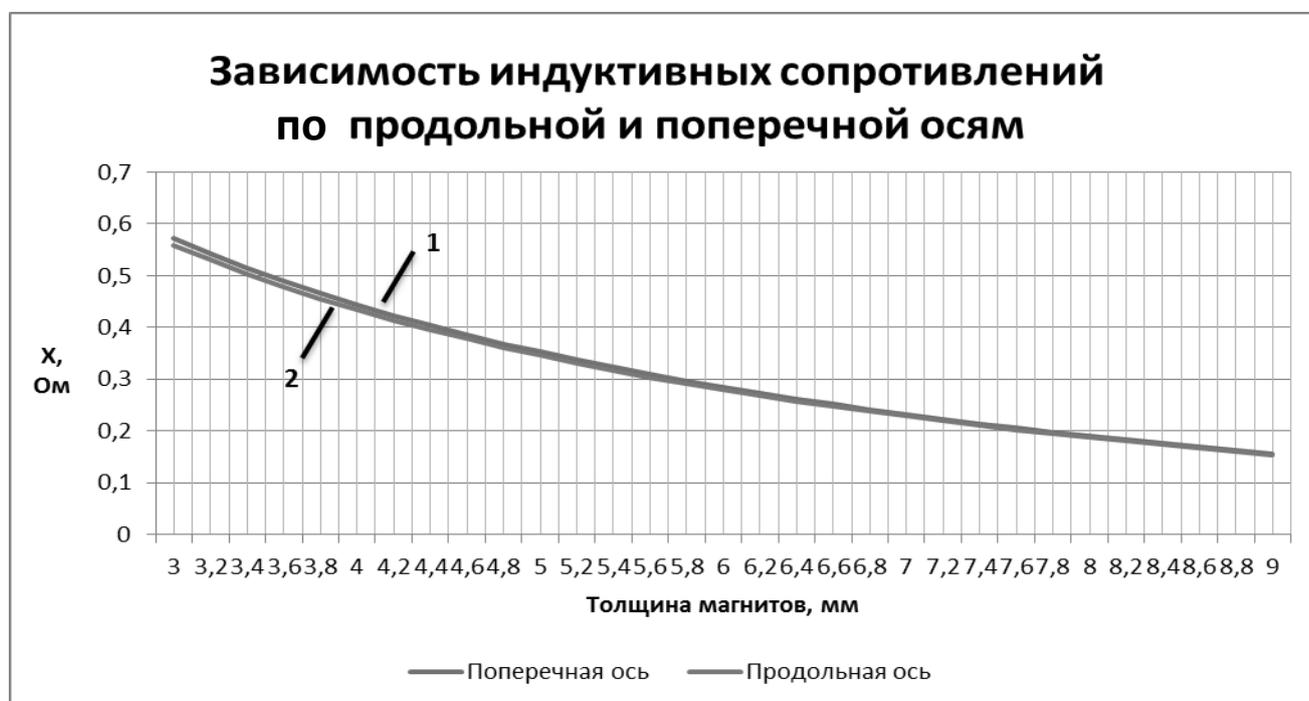


Рис. 2. Зависимость индуктивного сопротивления по поперечной и продольной осям высокоскоростной машины 30 кВт от толщины магнитов

На зависимости показаны две кривые, первая – сопротивление по поперечной оси, вторая – сопротивление по продольной оси. Отсюда видно, что при увеличении толщины магнитов влияние реакции якоря на машину уменьшается. Индуктивное сопротивление машины достаточно велико при малой толщине магнитов, однако при увеличении толщины в 3 раза, индуктивные сопротивления уменьшаются приблизительно в 3,5, что дает основание говорить об обратной зависимости. Уменьшение толщины магнитов при проектировании может понадобиться при уменьшении массы машины, когда масса ограничивается определенными рамками. Но не только общая масса машины может заставить уменьшить толщину магнитов, также на этот шаг может толкнуть механическая прочность ротора, когда масса магнитов негативно на ней сказывается, и существует возможность уменьшения ее за счет уменьшения массы магнитов без особого ущерба к индукции в зазоре. Зависимость индукции в воздушном зазоре представлена на рис. 3.

Из зависимости видно, каким образом изменится магнитная индукция в машине 30 кВт с магнитной системой звездочка.

При увеличении толщины магнитов, магнитная индукция как в зазоре, спинке

и в зубце увеличивалась до определенного момента, достигнув значения 8.6 мм. При данной толщине магнитов, магнитная индукция достигает своего пикового значения. Затем идет снижение, которое можно обосновать насыщением стали магнитопровода статора. Таким образом, увеличивается сопротивление стали, рост индукции далее невозможен.

Учитывая вышесказанное, и ориентируясь на нормальный режим работы машины, можно определить минимальную толщину магнитов, при которой можно добиться наименьшей массы, когда машина способна нормально функционировать, однако характеристики ее будут хуже, чем при нормальной толщине магнитов.

Ограничение на механическую постоянную времени также имеют место быть. Они определяются требуемым быстродействием машины. На деле эта величина означает время разгона машины с холостого хода в случае, когда момент на валу присутствует.

Для генераторов это ограничение определяется в зависимости от требуемой скорости запуска, для двигателя же эта величина непосредственно определяет быстродействие в динамических режимах.



Рис. 3. Зависимость магнитной индукции от толщины магнитов высокоскоростной машины на 30 кВт

Удельная масса – параметр, который связывает ограничения, о которых было сказано ранее, и он является важнейшим показателем БЭМ. Для общего случая

$$m^* = \frac{\pi k_D^2 k_\gamma k_k \gamma}{4kAB_\delta n}$$

Откуда следует, что для снижения удельной массы необходимо как можно более уменьшить произведение $k_D^2 k_\gamma k_k \gamma$, которое непосредственно связано с оптимальными конструктивными исполнениями машины и их реализацией, увеличить на сколько это возможно электромагнитные нагрузки, индукцию в зазоре и частоту вращения. Таким образом, можно добиться оптимального случая удельной массы для машины.

Существует достаточно много ограничений, которые вызывают определенные трудности при проектировании БЭМ с ПМ. В данной статье, авторы рассмотрели на определенном примере, как могут повлиять ограничения на электромагнитные нагрузки и массогабаритные ограничения. Анализируя данные проведенных исследований в программном комплексе Ansoft Maxwell 14.0, можно сделать вывод, что при изменении электромагнитных параметров, сразу же меняются и параметры на другие ограничения. Ярким примером может служить связка электромагнитных ограничений и ограничений на термальную нагрузку машины. Таким образом, при ухудшении электромагнитных показателей, возрастает термальная нагрузка на машину, и прежний способ охлаждения машины может уже не подойти и требуется изменение способа охлаждения. Здесь также стоит сказать о массогабаритных характеристиках, таких как удельная масса. Мы рассмотрели пример с уменьшением массы магнитов, но данный способ не всегда рационален, т.к. в большинстве случаев сначала добиваются уменьшения массы других частей машины, и уже потом уменьшают массу магнитов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бут Д. А. Бесконтактные электрические машины: [учебное пособие для студентов электромеханических и электроэнергетических специальностей вузов] /

Д. А. Бут.— 2-е изд., перераб. и доп. — Москва: Высшая школа, 1990.— 415 с. [D.A. But, Contactless electrical machines. Moscow: The higher school, 1990.]

2. Исмагилов Ф. Р., Хайруллин И. Х., Вавилов В. Е. Высокооборотные электрические машины с высококоэрцитивными постоянными магнитами / Москва : Инновационное машиностроение, 2017.— 248 с. [F.R. Ismagilov, I.H. Khayrullin, V.E. Vavilov, High-speed electrical machines with high-coercivity permanent magnets. Moscow: The innovation mechanical engineering, 2017.]

3. David G., Abdeslam M., Neil L. B., Chris G., High-Speed Electrical Machines: Technologies, Trends, and Developments// IEEE Transactions on Industrial Electronics, VOL. 61, NO 6, P. 2946-2959. [G. David, M. Abdeslam, B.L. Neil, G. Chris, "High-Speed Electrical Machines: Technologies, Trends, and Developments" in IEEE Transactions on Industrial Electronics, VOL. 61, NO 6, P. 2946-2959.]

ОБ АВТОРАХ

ВАВИЛОВ Вячеслав Евгеньевич, к.т.н., доцент кафедры ЭМ УГАТУ.

ЕМАТИН Евгений Александрович, студент 3 курса УГАТУ.

METADATA

Title: Restrictions at design of contactless electrical machines with permanent magnets

Authors: V. E. Vavilov¹ E. A. Ematin²

Affiliation:

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: ¹s2_88@mail.ru, ²vjeka@mail.ru

Language: Russian.

Source: Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), no. 1 (20), pp. 29-34, 2019. ISSN 2225-9309 (Print).

Abstract: Within this article the problem of the restrictions connected with different influences on parameters of the contactless electrical machine (CEM) with the permanent magnets (PM) is considered. The research in the program Ansoft Maxwell 14.0 complex is also conducted. The essence of a research consists in change of induced resistances on longitudinal and cross axes, the magnetizing and demagnetizing reaction of an anchor of the machine and influence of these phenomena on its efficiency are described. And also influence of thickness of magnets on machine parameters. Interrelation of restrictions, that is at a significant change in parameters of the machine, change of certain nodes of the unit is necessary.

Key words: Ansoft Maxwell, BEM with PM, restrictions, parameters, thickness of magnets, VPM.

About authors:

VAVILOV, Vyacheslav Evgenyevich, Candidate of Technical Sciences, associate professor EM UGATU.

EMATIN, Evgeny Aleksandrovich, student 3 courses.