

ВЛИЯНИЕ ЗАЩИТНОЙ ГИЛЬЗЫ СТАТОРА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ

В.В. Магин, М.Б. Панасюк, Д.В. Левин

Рассматриваются герметичные синхронные электрические машины с возбуждением от постоянных магнитов с защитной металлической гильзой на статоре. Рассмотрено влияние защитной гильзы на работу такой электрической машины. Описан способ определения активного сопротивления гильзы. Показан способ приведения параметров гильзы статора к параметрам статора электрической машины. Показано построение векторной диаграммы герметичной синхронной электрической машины с возбуждением от постоянных магнитов с защитной металлической гильзой на статоре в режиме холостого хода и при номинальной нагрузке. Приведена схема замещения синхронной электрической машины с возбуждением от постоянных магнитов с защитной металлической гильзой на статоре, позволяющая учесть потери в гильзе. Даны рекомендации по выбору типа и геометрии защитной гильзы статора герметичной синхронной электрической машины с возбуждением от постоянных магнитов.

Ключевые слова: герметичные электрические машины, гильза статора, векторная диаграмма.

В последнее время в морской технике широкое распространение получили электроприводы герметичных электронасосов специального назначения [1, 2]. Особенностью герметичных электроприводов является наличие неподвижной металлической немагнитной гильзы в зазоре между статором и ротором, которая оказывает влияние на рабочие свойства двигателя наличием потерь энергии от вихревых токов, наводимых вращающимся магнитным полем в металлической гильзе. В зависимости от степени агрессивности перекачиваемой жидкости защитные гильзы выполняются из нержавеющей стали или титанового сплава.

Потери в гильзе зависят от удельного электрического сопротивления и толщины гильзы. В связи с этим этого толщина гильзы статора выбирается по возможности меньше, а материал для гильзы применяют с максимально возможным удельным электрическим сопротивлением. Потери в гильзе также зависят от линейной скорости вращения магнитного поля (линейной скорости вращения ротора), следовательно, для того чтобы уменьшить потери в гильзе, необходимо уменьшить диаметр расточки статора. При этом одновременно уменьшится массивность арматуры статора, воспринимающей давление жидкости. Кроме этого, потери в гильзе зависят от плотности магнитного потока в зазоре. Если снизить плотность магнитного потока, то снизятся и потери в гильзе, однако неизбежно увеличатся габариты электрической машины и, следовательно, увеличится площадь поверхности гильзы. Это приведёт к увеличению потерь в гильзе. Таким образом, при проектировании герметичных электрических машин (ЭМ) необходимо найти оптимальную конструкцию

двигателя, которая обеспечивает минимальные потери в гильзе статора.

Влияние металлической гильзы статора на характеристики электрической машины может быть определено, если известны её параметры. В расчёте гильза статора может быть представлена короткозамкнутыми витками, количество которых определяется полностью ЭМ. Активное сопротивление гильзы обычно много больше её индуктивного сопротивления.

В работе рассматриваются электрические машины средней мощности.

Активное сопротивление может быть вычислено по геометрическим размерам гильзы. Развёртка гильзы статора двухполюсной машины с осевой длиной сердечника статора L и диаметром расточки статора D_i с указанием направлений вихревых токов L_g представлена на рис. 1.

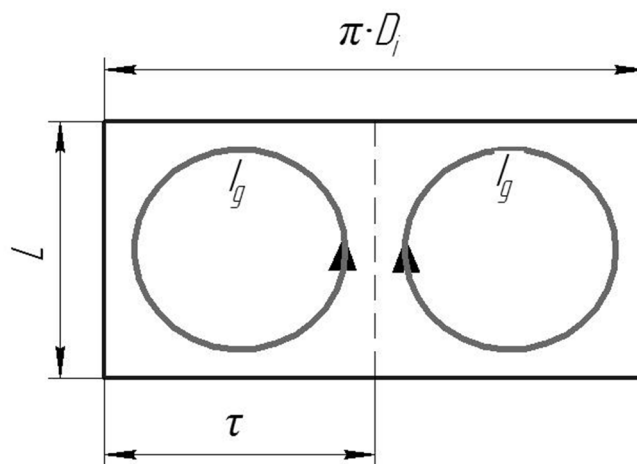


Рис. 1. Развёртка гильзы статора двухполюсной машины

Определение сопротивления гильзы для одного полюса производится по среднему значению длины контура замыкания вихревого тока:

$$R_r = \rho \left(\frac{2\tau}{Lh} + \frac{2L}{\tau h} \right),$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление материала гильзы статора; h – толщина гильзы статора; $\tau = \pi D_i / 2p$ – полюсное деление.

Приведённое сопротивление гильзы вычисляется через коэффициент приведения, при этом число фаз гильзы принимается равным числу пар полюсов:

$$R'_r = \frac{mw^2}{2p} R_r.$$

Так как гильза статора находится непосредственно на поверхности рашотки и пронизывается общим рабочим потоком, то магнитное сопротивление потоку реакции якоря и потоку создаваемому вихревыми токами гильзы статора практически одинаковы, следовательно, для расчётов можно принять, что приведённое индуктивное сопротивление гильзы равно индуктивному сопротивлению обмотки статора:

– для неявнополюсной электрической машины

$$X'_r = X_{ad} = X_{aq};$$

– для явнополюсной электрической машины

$$X'_{dr} = X_{ad}; X'_{qr} = X_{aq},$$

где X'_r – приведённое к обмотке статора индуктивное сопротивление реакции гильзы; X'_{dr}, X'_{qr} – приведённое к обмотке статора индуктивное сопротивление реакции гильзы по осям d и q ; X_{ad}, X_{aq} – индуктивное сопротивление обмотки статора по осям d и q .

В дальнейшем будут рассмотрены только ЭМ в которых индуктивные сопротивления по осям d и q равны.

Приведённая ЭДС гильзы статора равна ЭДС обмотки статора:

$$E'_r = E_o,$$

где E'_r – приведённая к обмотке статора ЭДС гильзы; E_o – ЭДС обмотки статора.

Следовательно, приведённое значение тока в гильзе статора электрической машины может быть вычислено по формуле

$$I'_r = \frac{E'_r}{\sqrt{R_r'^2 + X_r'^2}}.$$

Оценка влияния металлической гильзы статора выполнена при помощи векторной диаграммы. Векторная диаграмма ЭМ с возбуждением от постоянных магнитов подробно рассмотрена в [3]. На рис. 2 представлена векторная диаграмма электрического двигателя с возбуждением от постоянных магнитов средней мощности. Так как активное сопротивление обмотки статора много меньше индуктивного, то активным сопротивлением можно пренебречь.

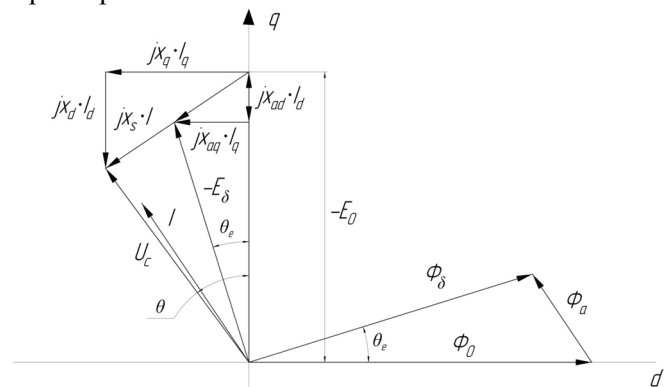


Рис. 2. Векторная диаграмма синхронного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов: Φ_0 – поток от постоянных магнитов; Φ_a – поток реакции якоря; Φ_δ – результирующий поток в зазоре ЭМ; E_o – ЭДС холостого хода, наводимая потоком от постоянных магнитов; E_δ – результирующая ЭДС; I – ток обмотки статора; I_d, I_q – токи статора по осям d и q ; U_c – напряжение сети; x_c – индуктивное сопротивление рассеяния статора; θ_e – пространственный угол между осями результирующего потока и потока постоянного магнита; θ – угол нагрузки (угол между векторами напряжения сети и ЭДС холостого хода)

Поток реакции якоря приводит к сдвигу результирующего потока относительно потока постоянных магнитов на угол θ_e . Угол сдвига зависит от индуктивного сопротивления обмотки и тока статора.

Векторная диаграмма синхронного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов с гильзой статора на холостом ходу представлена на рис. 3. Векторная диаграмма для гильзы может быть

отображена в виде векторной диаграммы вторичной цепи трансформатора в режиме короткого замыкания.

Поток от постоянных магнитов наводит в гильзе ЭДС E'_r , которая создаёт ток I'_r . Ток гильзы создаёт поток гильзы статора Φ_{0r} , который как видно из рис. 3 приводит к смещению результирующего потока $\Phi_{\delta 0r}$ относительно потока постоянных магнитов на угол γ .

Это приводит к смещению осей d и q в электрических машинах с металлической немагнитной гильзой статора на угол γ . Кроме этого, если пренебречь потерями холостого хода (потерями в сердечнике статора и механическими потерями), то угол γ также равен углу между векторами напряжения питания и ЭДС холостого хода электрической машины с металлической гильзой E_{0r} , что в классической теории именуется углом нагрузки, т. е. при установке металлической гильзы в ЭМ необходимо подвести дополнительную мощность из сети, равную потерям в металлической гильзе статора, что приводит к увеличению тока статора и снижению максимального полезного момента на валу ЭМ.

В реальных ЭМ на холостом ходу угол γ будет немного больше, так как помимо потерь в гильзе всегда присутствуют потери холостого хода, однако величина этих потерь существенно меньше.

На практике угол γ не превышает 5° , так как дальнейшее увеличение угла приводит к существенному снижению КПД ЭМ и усложняет её систему охлаждения. Кроме этого, как видно из рис. 3, если $R_r \gg X_r$ (гильза имеет малую толщину и выполнена из материала с большим удельным электрическим сопротивлением), то металлическая гильза статора практически не оказывает влияния на амплитудное значение ЭДС обмотки якоря.

На рис. 4 представлена векторная диаграмма синхронного двигателя с металлической гильзой и без неё в номинальном режиме. Сплошными линиями показаны векторы ЭМ без гильзы, штриховыми линиями показаны векторы ЭМ с металлической гильзой.

В номинальном режиме ток гильзы определяется результирующим потоком в зазоре Φ_δ , который наводит в гильзе ЭДС E'_r . В результате ток гильзы статора создаёт поток Φ_r . В результате взаимодействия потоков от постоянных магнитов, реакции якоря и гильзы статора создаётся результирующий поток в зазоре ЭМ $\Phi_{\delta r}$, который сдвинут

относительно результирующего потока ЭМ без гильзы на угол γ' .

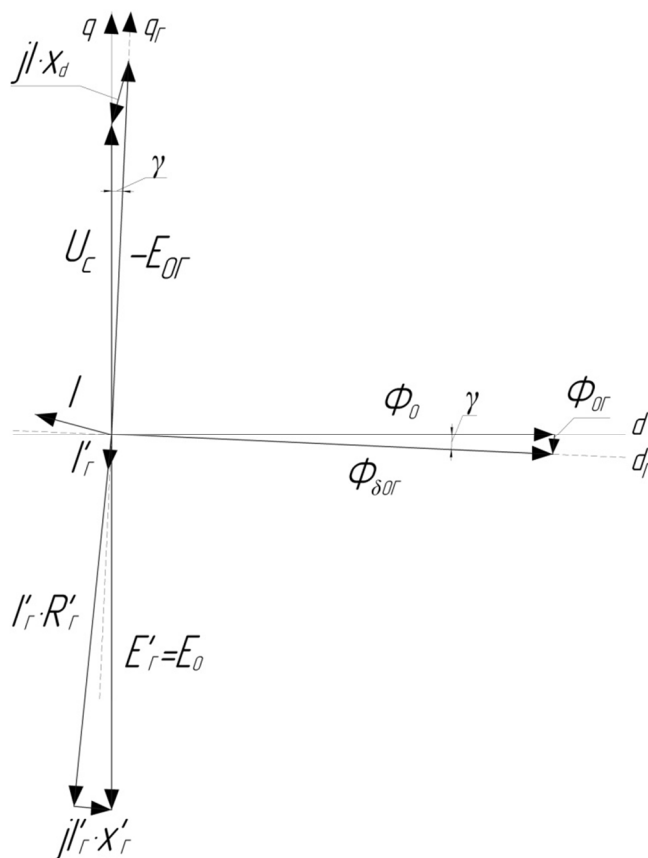


Рис. 3. Векторная диаграмма синхронного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов с гильзой статора на холостом ходу

Из рис. 4 видно, что угол нагрузки ЭМ с металлической гильзой в номинальном режиме увеличивается на угол γ , что эквивалентно увеличению тока якоря I_{AG} , на величину, необходимую для покрытия потерь в гильзе. Также следует отметить, что при установке гильзы статора незначительно смещается вектор тока относительно вектора напряжения, что говорит о снижении коэффициента мощности ЭМ с металлической гильзой.

Таким образом, если $R_r \gg X_r$, то гильза статора не оказывает существенного влияния на величину потока в зазоре ЭМ, а лишь приводит к его смещению на небольшой угол. Поэтому в таких ЭМ металлическую гильзу в схеме замещения можно учитывать как дополнительные потери, приводящие к увеличению тока статора. При этом на схеме замещения ЭМ гильза статора может быть представлена в виде дополнительного сопротивления R'_r , необходимого для учёта потерь в гильзе (рис. 5).

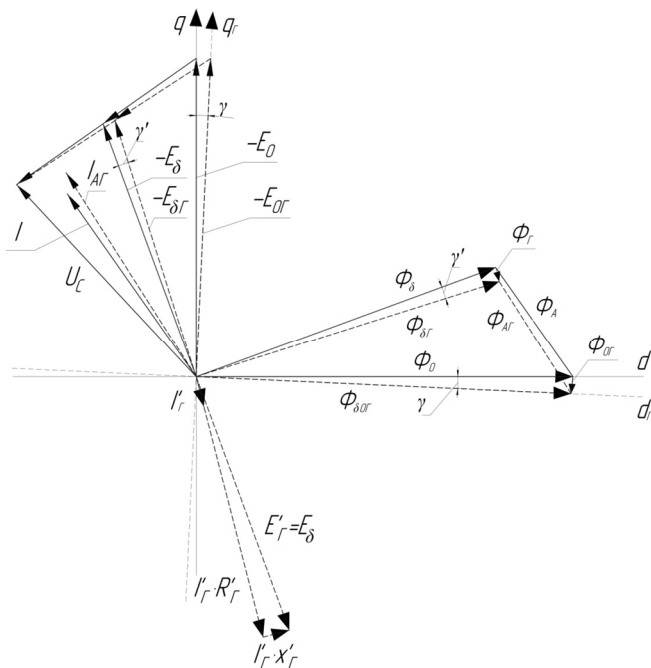


Рис. 4. Векторная диаграмма синхронного двигателя с металлической гильзой и без металлической гильзы в номинальном режиме

Установка в ЭМ гильзы статора, имеющей измеримое активное и индуктивное сопротивление, приведёт к существенному изменению параметров ЭМ. Ток гильзы приведёт к снижению результирующего потока, а также к его смещению на значительный угол.

Однако на практике такие машины встречаются крайне редко, так как ЭМ с гильзой с низким ак-

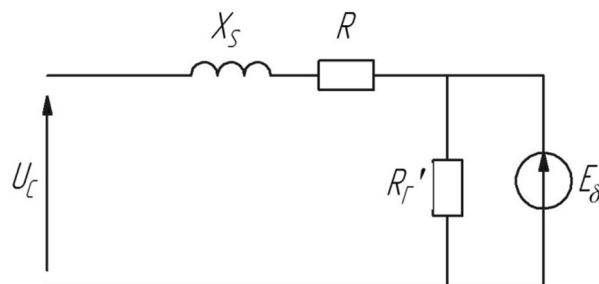


Рис. 5. Схема замещения ЭМ с возбуждением от постоянных магнитов при $R'_Γ \gg X'_Γ$

тивным сопротивлением являются очень малоэффективными (КПД не более 50%), что ставит вопрос о целесообразности их применения.

Литература

1. Коварский М. Е., Портной Ю. Т., Магин В. В., Рожков Д. В. Результаты разработки нового поколения маломощных электроприводов герметичных электронасосов // Труды VII Международной (XVIII Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2012, 2012 г.
2. Макриденко Л. А., Сарычев А. П., Думнов В. Н., Коварский М. Е., Магин В. В. Электронасосы специального назначения // Труды научно-технической конференции с международным участием «Актуальные вопросы и перспективы развития электромашиностроения», 2015 г.
3. Осин И. Л. Синхронные электрические двигатели малой мощности / И. Л. Осин. – М. : Издательский дом МЭИ, 2006.

Поступила в редакцию 23.08.2016.

Вячеслав Валерьевич Магин, начальник лаборатории, т. (495) 365-26-14, e-mail: maginv@rambler.ru.

Максим Борисович Панасюк, инженер, т. (495) 365-26-14, e-mail: panasux@ya.ru.

Дмитрий Викторович Левин, главный конструктор по преобразователям частоты, т. (495) 366-34-22, e-mail: soulver_sh@mail.ru.
(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).

EFFECTS of STATOR PROTECTION SLEEVE on CHARACTERISTICS of ELECTRIC MACHINE

V.V. Magin, M.B. Panasyk, D.V. Levin

The article studies sealed synchronous permanent magnet electric machines with stators protected by metal sleeves. Effects of protection sleeves on operation of such an electric machine have been evaluated. The article describes a method for measuring of sleeve active resistance. A method for adjusting of stator protection sleeve characteristics to those of electric machine stator is given the article. Construction of vector diagrams for sealed synchronous permanent magnet electric machines with stators, protected by a metal sleeve, operating in no-load and nominal load modes, has been demonstrated. The article presents an equivalent circuit of a synchronous electric machine with

stator protected by metal sleeve, which allows taking into account sleeve losses. In the article, recommendations on selection of type and geometry of protection sleeves for stators of sealed synchronous permanent magnet electric machines have been given.

Key words: sealed electric machines, stator protection sleeve, vector diagram.

List of References

1. Kovarskii M. E., Portnoi Iu. T., Magin V. V., Rozhkov D. V. Developing results of new generation low-noise electric drives for sealed electrical pumps // Proceedings of the VIIth International (XVIIIth All-Russian) Conference on fully automatic electric drive АЭП-2012, 2012.
2. Makridenko L. A., Sarychev A. P., Dumnov V. N., Kovarskii M. E., Magin V. V. Special purpose electropumps // Proceedings of the Scientific-Technical Conference with international participation «Actual issues and prospects for electric machine industry», 2015.
3. Osin I. L., Synchronous electric small-power motors / I. L. Osin. – M. : MEI Publ. [MEI – Moscow Power Engineering Institute], 2006.

Viacheslav Valerievich Magin, Head of Laboratory,
tel.: (495) 365-26-14, e-mail: maginv@rambler.ru.

Maksim Borisovich Panasiuk, Engineer,
tel.: (495) 365-26-14, e-mail: panasux@ya.ru.

Dmitrii Viktorovich Levin, Chief Designer for developing of frequency transformers,
tel.: (495) 366-34-22, e-mail: soulver_sh@mail.ru.
(JC «VNIEM Corporation»).