

Новая концепция линейного генератора со свободным поршнем с поперечным магнитным потоком (часть 2).

Перевод Духанин В.И.

Сайт <http://centaurproject.com/>

4. Характеристики машины.

Были исследованы две различных конфигурации новых TFM конструкции. На рис.5 показаны два поперечных сечения для двух TFM машин.

Соответственно выражению (8) толщина трубы подвижного элемента обратно пропорциональна количеству пазов. Как только вес подвижного элемента становится критическим требованием, желательно увеличение числа пазов. Однако, увеличенное

количество пазов дает в результате большее количество магнитных частей, которое означает усложнение производственного процесса.

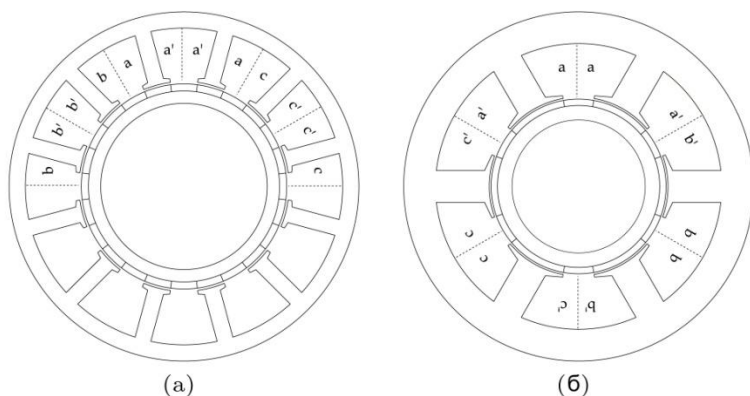


Рис.5. Поперечное сечение двух TFM машин новой конструкции: а) $Q_s=12$; б) $Q_s=6$.

Сила для линейного TFM соответственно [1], дается выражением:

$$F = \hat{B}_{\delta l} \cdot \hat{S} \cdot k_w \cdot \frac{A_{active}}{2} \quad (1)$$

где k_w - фактор обмотки,

$\hat{B}_{\delta l}$ - пиковое фундаментальное значение плотности магнитного потока в воздушном зазоре;

A_{active} - активная область воздушного зазора;

\hat{S} - токовая нагрузка для машины.

В TFM-машине токовая нагрузка задается уравнением [1]:

$$\hat{S} = \frac{\sqrt{2} N_s \cdot I}{2 \tau_p} \quad (2)$$

Фундаментальное значение плотности магнитного потока дается [1]:

$$\hat{B}_{\delta l} = \frac{4}{\pi} B_m \cdot \sin(\alpha) \quad (3)$$

Пренебрегая краевым эффектом, плотность магнитного потока в воздушном зазоре, производимая магнитами, может быть вычислена по следующей формуле:

$$B_m = B_{r,m} \cdot \left(\frac{1}{1 + \mu \cdot \frac{\delta_e}{l_m}} \right) \quad (4)$$

Где $B_{r,m}$ - остаточный магнитный поток магнитов, выбранный равным 1,1 Т при 100°C;

δ_e - эквивалентная длина воздушного зазора;

l_m - толщина магнита.

Относительная проницаемость магнита равна 1,05, эквивалентная длина воздушного зазора вычисляется умножением длины реального воздушного зазора на коэффициент 1,5 для учета насыщения магнитопровода.

Напряжение постоянного тока инвертера и максимум фазового напряжения можно вычислить по формуле[2]:

$$U_{phase} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_{DC} \quad (5)$$

Индукцируемая ЭДС при отсутствии нагрузки дается следующим уравнением:

$$E_{phase} = \omega \cdot N_s \cdot \Phi_{stack} \quad (6)$$

где Φ_{stack} - общий магнитный поток, вычисляемый по формуле:

$$\Phi_{stack} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \hat{B}_{\delta 1} \cdot \tau_s \cdot \omega_m \cdot N_{stack} \cdot \frac{Q_s}{3} \quad (7)$$

Толщина магнитопровода подвижного элемента вычисляется как:

$$h_{rr} = \frac{\hat{B}_{\delta 1} \cdot 4 \cdot R_{touter}}{B_{rr} \cdot Q_s} \quad (8)$$

где B_{rr} - магнитный поток в магнитопроводе подвижного элемента, полагаемый равным 1,8 Т.

Общая индуктивность машины является суммой главной индуктивности и индуктивных потерь. Более того, потери индуктивности могут быть поделены на четыре различных группы.

Главная индуктивность вычисляется соответственно формуле:

$$L_m = \frac{2}{\pi} \cdot \tau_s \cdot \omega_m \cdot N_{stack} \cdot \frac{Q_s}{3} \cdot N_s^2 \cdot \frac{4\pi}{\left(\delta_e + \frac{l_m}{\mu_m}\right)} \quad (9)$$

Индукционные потери паза вычисляются из следующего уравнения:

$$L_{slot} = 2 \cdot \mu_0 \cdot \lambda \cdot \omega_m \cdot N_{stack} \cdot \frac{Q_s}{3} \cdot N_s^2 \quad (10)$$

где λ - коэффициент удельной проницаемости отверстия слота и может вычисляться по выбранным геометрическим параметрам паза, соответственно следующему выражению: $\lambda =$

$$\frac{h_1}{3b_{ss}} + \frac{h_{ti}}{b_{ss}} + \frac{h_{tt}}{b_{s0}} + \frac{h_{ts}}{b_{ss} - b_{s0}} \cdot \ln\left(\frac{b_{ss}}{b_{s0}}\right) \quad (11)$$

где h_l - расстояние для обмотки паза и может вычисляться следующим образом:

$$h_l = h_{ss} - h_{tt} - h_{ts} - h_{ti} \quad (12)$$

Индукционные потери на краях:

$$L_{end} = \lambda_{end} \cdot l_{end} \cdot 2 \cdot \frac{Q_s}{3} \cdot 4\pi \cdot N_s^2 \quad (13)$$

где l_{end} - длина края обмотки;

λ_{end} - коэффициент удельной проницаемости [3], вычисляемый по следующей формуле:

$$\lambda_{end} = \frac{k_a}{0,3 + \tau} \quad (14)$$

где τ - шаг полюсов;

k_a - эмпирический коэффициент, выбираемый в диапазоне 0,15-0,20 [3].

Индукционные потери в воздушном зазоре и потери между пакетами вычисляются по формуле:

$$L_l = \sigma_l \cdot L_m \quad (15)$$

где коэффициент σ_l может быть выведен соответственно для потерь в воздушном зазоре для потерь между пакетами:

$$\sigma_{l_{gap}} = \frac{3}{4} \cdot \frac{\frac{l_m}{\mu_{rm}} + \delta_e}{\left(\frac{1}{2} \cdot l_\delta + \frac{3}{8} \cdot \tau_s\right) \cdot 0,9} \quad (16)$$

$$\sigma_{l_{stack}} = \frac{3}{2} \cdot \frac{\frac{l_m}{\mu_{rm}} + \delta_e}{h_1 + \frac{1}{4} \cdot (b_{sr} + b_{ss})} \quad (17)$$

Потери в меди и магнитопроводе вычисляются соответственно [3]:

$$P_{cu} = 3 \cdot R \cdot I_a^2 \quad (18)$$

$$P_{fe} = 0,078 \cdot W_f \cdot f \cdot (100 + f) \cdot \hat{B}_{fe}^2 \cdot G_{fes} \cdot 10^{-3} \quad (19)$$

где f - частота;

\hat{B}_{fe} - пиковый магнитный поток в магнитопроводе;

G_{fes} - вес магнитопровода.

W_f - фактор потерь, который зависит от толщины слоев магнитопровода и равен 2,7 для толщины листов 0,35 мм.

5. Фактор мощности.

Выходная мощность электрической машины задается выражением:

$$P = 3 \cdot U_a \cdot I_a \cdot \cos\varphi \quad (20)$$

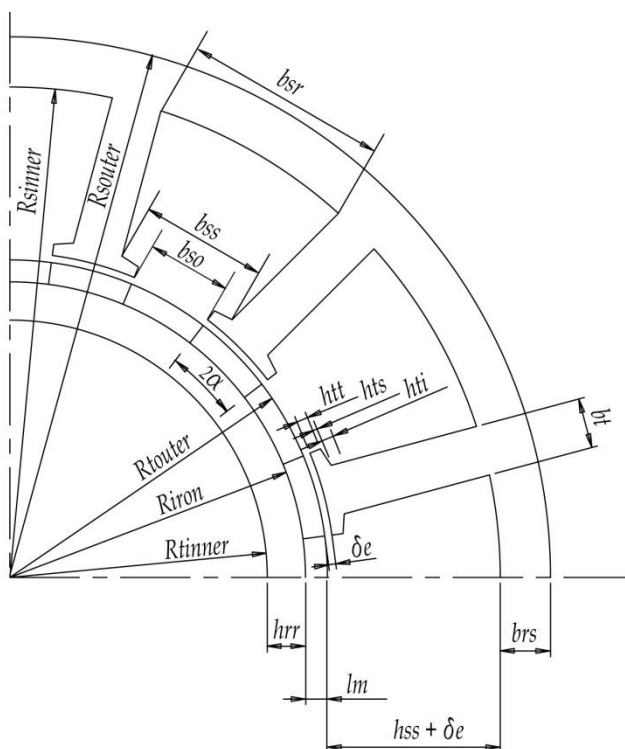


Рис. 6. Параметры машины.

проходит ближе в фазе с выходным напряжением, например, введением d-токовой компоненты в вектор тока.

TFM машины известны своей высокой плотностью силы/момента, однако это дается ценой низкого фактора мощности [4], то есть последний коэффициент в уравнении (20) мал.

Проблема с низким фактором мощности обсуждалась в [4]. Представление TFM в виде фазовой диаграммы в сущности идентично фазовой диаграмме обычной синхронной машины. Если пренебречь падением напряжения из-за сопротивления обмотки, получается простая фазовая диаграмма. В основном фактор мощности может быть улучшен посредством конструктивных мер [1] или путем управления током, так чтобы он

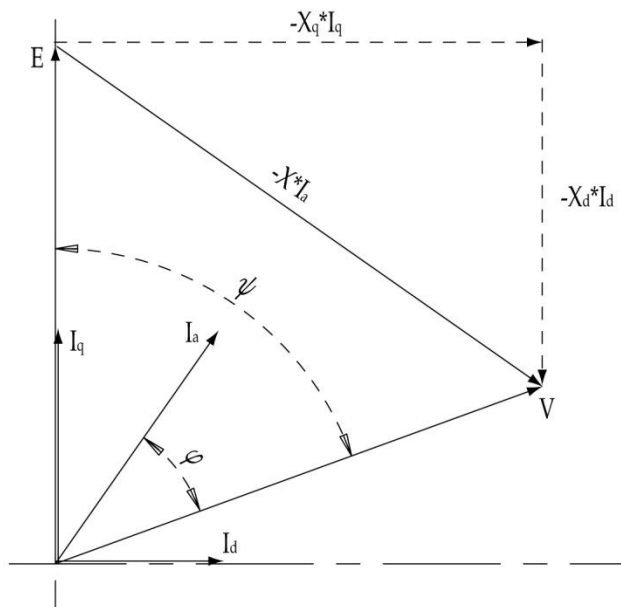


Рис.7. Фазовая диаграмма.

Если используется последний метод, то анализ возможного улучшения $\cos\phi$ может быть сделан, разбирая отношение между падением напряжения на реактивном сопротивлении и индуцируемой ЭДС $I\chi/\text{ЭДС}$. Показано, что если отношение высоко, например, 2 или выше,

Таблица 1. Аналитические результаты.	
Параметр	Значение
Масса транслятора, кг	5,8
Фактор мощности	0,78
Развиваемое усилие, кН	4,1
КПД, %	94
Количество полюсов	19
Высота магнита, мм	3,8
Магнитопровод подвижного элемента, мм	6,8

введение d-тока не улучшает фактор мощности. Однако, если отношение ближе к единице или ниже, тогда фактор мощности может быть повышен.

В машине, представленной здесь, из аналитических вычислений отношение между индуцируемой ЭДС и падением напряжения на реактивном сопротивлении было определено близким к единице. Для поверхностно монтируемых магнитов d-осевое реактивное сопротивление и q-осевое реактивное сопротивление равны. Соответственно выводам, изложенным выше, фактор мощности может быть, таким образом, улучшен введением тока между индуцируемым напряжением и выходным напряжением соответственно рис.7.

6. Выводы.

В этой статье представлена новая линейная TFMмашина. Разработана аналитическая модель для конструкции с поверхностно монтируемыми магнитами. Используя разработанные уравнения, вычисленная сила была определена равной 4,1 кН, а подвижная масса транслятора равной 5,8 кг.

Была использована 2Dмодель для разработки аналитических выражений,а некоторые эмпирические коэффициенты были использованы для того, чтобы предсказать потери в 3-м измерении. Анализ Холбах-ориентированных магнитов еще будет выполнен вместе с проверкой аналитической модели с 3D МКЭ симуляцией.

Список литературы:

- [1] *W. M. Arshad: A Low-Leakage Linear Transverse-Flux Machine for a Free-Piston Generator, Ph.D. Thesis, ISBN 91-7283-535-4, Royal Institute of Technology, Stockholm, 2003*
- [2] *N. Mohan, T. M. Undeland, W. P. Robbins: Power Electronics- Converters, Applications and Design-2nd ed.,ISBN 0-471-58408-8, Jhon Wiley & Sons, 1995*
- [3] *C. Sadarangani: Electrical Machines, Design and Analysis of Induction and Permanent Magnet Motors, ISBN 91-7170-627-5, KTH Hgskoletyckeriet, Stockholm, 2000*
- [4] *M. R. Harris, G. H. Pajooman, S. M. Abu Sharkh: The problem of power factor in VRPM (Transverse-Flux) Machines,EMD, Conference Publication No. 444, IEE, September, 1997*