

СИНТЕЗ ТЯГОВОГО РЕАКТИВНОГО ИНДУКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ С АКСИАЛЬНЫМ МАГНИТНЫМ ПОТОКОМ ДЛЯ СКОРОСТНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Наведено методику синтезу реактивного індукторного двигуна з аксіальним магнітним потоком для швидкісного рухомого складу. Синтез здійснюється шляхом розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації.

Приведена методика синтеза реактивного индукторного двигателя с аксиальным магнитным потоком для скоростного подвижного состава. Синтез осуществляется путем решения задачи многокритериальной оптимизации.

ВВЕДЕНИЕ

Важнейшей задачей, которую надо решить для создания сети скоростных магистралей, является создание подвижного состава и его важнейшего элемента – тягового электропривода. Именно от его энергетической эффективности и затрат на эксплуатацию будет зависеть конкурентоспособность пассажирских перевозок на скоростных линиях. Сердцем тягового привода является тяговый двигатель, конструкция и принцип действия, которого определяет характеристики тягового электропривода в целом.

Одними из перспективных в этом направлении являются тяговые двигатели с поперечным полем. Особенностью таких тяговых двигателей является применение постоянных магнитов, что и позволяет в этих двигателях получить высокие удельные показатели. Однако известны конструкции двигателей, в которых постоянные магниты не применяются. В литературе они известны как многопакетные индукторные двигатели с аксиальным магнитным потоком. Они нашли применение в качестве силовых приводов. Поскольку изготовление машин с постоянными магнитами требует чрезвычайно высокой культуры производств, считаем уместным рассмотреть именно вариант индукторного двигателя с аксиальным магнитным потоком, конструкция которого представлена в [1].

Теория проектирования индукторных машин, к которым относится реактивный индукторный двигатель с аксиальным магнитным потоком, находится в стадии становления. Многочисленные публикации носят, как правило, теоретический характер, не дают полной уверенности в справедливости полученного результата [2]. В такой ситуации представляется целесообразным искать новые подходы к решению задачи синтеза индукторных машин.

Исходя из вышесказанного, задача синтеза реактивного индукторного двигателя с аксиальным магнитным потоком (АИД) может быть сформулирована таким образом: необходимо создать устройство с заданными рабочими характеристиками (показателями) за счёт нахождения наилучшего сочетания конкретных геометрических и электромагнитных параметров устройства путём использованием процедуры оптимального проектирования.

Цель работы: провести синтез реактивного индукторного двигателя с аксиальным магнитным потоком для скоростного электропоезда.

МАТЕРИАЛ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исходя из вышесказанного, задача синтеза реактивного индукторного двигателя с аксиальным магнитным потоком может быть сформулирована таким образом: необходимо создать устройство с заданными рабочими характеристиками (показателями) за счёт нахождения наилучшего сочетания конкретных геометрических и электромагнитных параметров устройства путём использованием процедуры оптимального проектирования. Определяющим фактором аксиального индукторного двигателя с аксиальным магнитным потоком, используемого в безредукторном приводе, является развиваемый им электромагнитный момент. В работе [3] представлена методика определения электромагнитного момента для реактивного индукторного двигателя с аксиальным магнитным потоком. Особенностью модели является нахождение момента путём интегрирования закона изменения магнитной проводимости. Математическая модель для определения электромагнитного момента АИД может быть представлена следующей системой уравнений:

$$\left\{ \begin{aligned} M_{\text{дв}} &= \frac{mZ^2}{\pi} \left(\int_0^{U_a} [g_a U] dU - \int_0^{U_a} [g_u U] dU \right); \quad g_a = \frac{1}{1/g_{z1} + 1/g_{\delta a} + 1/g_{z2}}; \quad g_{z1} = \mu_{z1} \mu_0 \frac{b_{z1}}{h_{z1}} l_{z1}; \quad g_{z2} = \mu_{z2} \mu_0 \frac{b_{z2}}{h_{z2}} l_{z2}; \\ g_{\delta a} &= \mu_0 (b_{\delta}/\delta)_a l_{\delta}; \quad g_u = \mu_0 (b_{\delta}/\delta)_u l_{\delta}; \quad \mu_{z1} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{B_{z1}}{H_{z1}}; \quad \mu_{z2} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{B_{z2}}{H_{z2}}; \quad B_{z1} = B_{\delta} \frac{b_{\delta} l_{\delta}}{b_{z1} l_{z1}}; \quad B_{z2} = B_{\delta} \frac{b_{\delta} l_{\delta}}{b_{z2} l_{z2}}; \quad H_{z1} = f(B_{z1}); \\ H_{z2} &= f(B_{z2}); \quad (b_{\delta}/\delta)_a = \frac{1}{\beta} \ln \left(1 + \frac{4\beta \cdot \Delta h_{z1}}{2\delta + \beta |b_{z1} - b_{z2}|} \right) + \frac{2}{\beta} \ln \left(1 + \frac{\beta |b_{z1} - b_{z2}|}{2\delta} \right) + \frac{b_{\delta}}{\delta}; \quad U_a = H_{z1} h_{z1} + \frac{B_{\delta}}{\mu_0} \cdot \frac{b_{\delta}}{(b_{\delta}/\delta)_a} + H_{z2} h_{z2}; \\ (b_{\delta}/\delta)_u &= \frac{2}{\beta} \ln \left(1 + \frac{2\beta \Delta b_{z2}}{2\delta + \beta (b_{n2} - b_{z1})} \right) + \frac{2(b_{n2} - b_{z1})}{2\delta + \beta (b_{n2} - b_{z1})} + \frac{2}{\beta} \ln \left(1 + \frac{\beta b_{z1}}{2\delta + \beta (b_{n2} - b_{z1})} \right); \quad l_{\delta} = \min(l_{z1}, l_{z2}); \quad b_{z1} < b_{n2}; \quad h_{z1} > \frac{b_{n1}}{2}; \\ h_{z2} &> \frac{b_{n2}}{2}; \quad |b_{z1} - b_{z2}| \leq 4\delta; \quad |l_{z1} - l_{z2}| \leq 2\delta; \quad \min(b_{z1}, b_{z2}) > b_{z\text{min}}; \quad b_{z1} = \alpha_1 \frac{\pi D_i}{Z}; \quad b_{z2} = \alpha_2 \frac{\pi (D_i - 2\delta)}{Z}; \\ t_{z1} &= \frac{\pi \cdot D_i}{Z}; \quad t_{z2} = \frac{\pi \cdot (D_i - 2\delta)}{Z}; \quad b_{n2} = t_{z2} - b_{z2}; \quad \Delta h_{z1} = (0,15 \dots 0,2) t_{z1}; \quad \Delta b_{z1} = 0,1 t_{z2}; \quad \beta = \begin{cases} 1, & (b_{n2}/\delta) < 10 \\ (1,1 \dots 1,2), & (b_{n2}/\delta) > 10 \end{cases} \end{aligned} \right. \quad (1)$$

где $M_{\text{дв}}$ – средний момент двигателя, U_a – магнитное напряжение зубцового слоя, B_{z1} и B_{z2} – индукция

в зубце статора и ротора соответственно, B_{δ} – индукция в воздушном зазоре при номинальном магнитном

напряжении зубцового слоя, α_1 и α_2 – отношение ширины зубца статора к зубцовому делению статора и ротора соответственно, μ_{z1} – статическая магнитная проницаемость стали при индукции в зубце статора B_{z1} , μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, равная $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, l_{z1} и l_{z2} – осевая длина зубца статора и ротора соответственно, b_{z1} и b_{z2} , h_{z1} и h_{z2} , t_{z1} и t_{z2} , b_{n1} и b_{n2} , D_i , δ – геометрические соотношения, которые показаны на рис 1.

Таким образом, в качестве исходных данных для расчёта момента и магнитного напряжения будут выступать: m , Z , D_i , δ , α_1 , α_2 , h_{z1} , h_{z2} , l_{z1} , l_{z2} , B_δ .

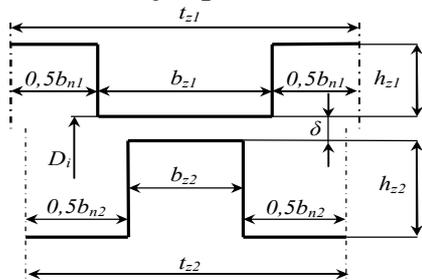


Рис. 1 Геометрические размеры зубцового слоя

Предварительные исследования позволили выявить ряд особенностей: ограничения "расчлняют" поисковое пространство на более "узкие" зоны; какое-либо значение момента или магнитного напряжения может быть достигнуто, как минимум, при двух сочетаниях геометрических размеров.

Поскольку в задаче имеем дело с одиннадцатью параметрами, то очевидно, что перебор сочетаний требует значительных временных затрат. Поэтому представляется целесообразным для проектирования АИД применить методы оптимизации. [4]

В качестве целевой функции считаем целесообразным принять магнитодвижущую силу фазной катушки, поскольку минимизация этой величины в общем случае способствует уменьшению фазного тока и расхода обмоточной меди. Это ведёт снижению массы двигателя, снижению класса полупроводниковых приборов тягового преобразователя, и способствует в целом снижению стоимости привода.

Магнитодвижущая сила фазной (МДС) катушки может быть определена по выражению:

$$F = 2U_a + U_{f1} + U_{f2}, \quad (2)$$

где U_a – магнитное напряжение зубцового слоя, U_{f1} – магнитное напряжение сердечника статора, U_{f2} – магнитное напряжение сердечника ротора.

$$U_1(\bar{x}) = \sum_{i=1}^9 (\max\{0; a_i - x_i\} + \max\{0; x_i - b_i\}); \quad U_2(\bar{x}) = b_{z \min} - \min\left(\frac{\alpha_1 \pi D_i}{Z}, \frac{\alpha_2 \pi (D_i - 2\delta)}{Z}\right);$$

$$U_3(\bar{x}) = D_i(\alpha_1 + \alpha_2 - 1) + 2\delta(1 - \alpha_2); \quad U_4(\bar{x}) = |D_i(\alpha_1 - \alpha_2) + 2\delta\alpha_2| - \frac{4\delta Z}{\pi}; \quad U_4(\bar{x}) = |l_{z1} - l_{z2}| - 2\delta;$$

$$U_5(\bar{x}) = \frac{\pi(D_i - 2\delta)(1 - \alpha_2)}{2Z} - h_{z2}; \quad U_6(\bar{x}) = \frac{\pi D_i(1 - \alpha_1)}{2Z} - h_{z1}; \quad U_7(\bar{x}) = -S_{f1}; \quad U_8(\bar{x}) = -S_{f2};$$

$$U_9(\bar{x}) = \max\{0; M_0 - M(\bar{x})\} + \max\{0; M(\bar{x}) - 1,05M\};$$

$$U_{10}(\bar{x}) = B_{f1}(\bar{x}) - B_{f10}; \quad U_{11}(\bar{x}) = B_{f2}(\bar{x}) - B_{f20}; \quad U_{12}(\bar{x}) = U_a(\bar{x}), \quad (5)$$

где S_{f1} , S_{f2} – площадь поперечного сечения сердечников статора и ротора соответственно, B_{f10} и B_{f20} – наибольшие допустимые индукции в сердечниках.

Магнитные напряжения сердечников статора и ротора определяются по формулам

$$U_{f1} = H_{f1} l_{f1}; \quad (3)$$

$$U_{f2} = H_{f2} l_{f2}. \quad (4)$$

В этих выражениях H_{f1} и H_{f2} – напряжённости магнитного поля в сердечнике статора и ротора соответственно, l_{f1} и l_{f2} – длины сердечников статора и ротора соответственно.

Напряжённости H_{f1} и H_{f2} определяются по кривой намагничивания материала через индукции B_{f1} и B_{f2} в сердечниках статора и ротора, которые, в свою очередь, определяются через магнитный поток зубцового деления и площадь поперечного сечения сердечника. Последнюю можно определить через геометрические размеры зубцового слоя и размеры конструкции двигателя.

Определение длин сердечников l_{f1} и l_{f2} возможно только после определения МДС катушки и компоновки фазного блока двигателя. Но, поскольку, МДС катушки зависит от l_{f1} и l_{f2} , то этот процесс носит итерационный характер и решение такой задачи, очевидно, требует больших временных затрат.

Поэтому, предлагаем вместо минимизации магнитных напряжений U_{f1} и U_{f2} минимизировать индукции B_{f1} и B_{f2} в сердечниках статора и ротора. Это приведёт к уменьшению напряжённостей H_{f1} и H_{f2} , поскольку при уменьшении индукции уменьшается напряжённость в соответствии с кривой намагничивания материала. А при компоновке фазного блока потребовать выполнение сердечников статора и ротора с минимально возможными длинами.

Минимизация магнитного напряжения производится с использованием математической модели (1).

Таким образом, минимизация МДС фазной катушки может быть сформулирована как задача многокритериальной оптимизации.

Для решения оптимизационных задач с целью определения оптимальных геометрических и электрофизических параметров устройств наиболее приемлем иерархический подход [5].

Выполним процедуру построения иерархии критериев применительно к задаче оптимизации АИД.

Наивысший приоритет присвоим критерию, объединяющему в себе параметрические ограничения и характеризующему степень нарушения гиперпараллелипипеда D допустимой области изменения вектора варьируемых параметров:

Также необходимо после выполнения оптимизации провести эскизную проработку с целью определить осевую длину машины и, соответственно, возможность её вписывания в отведенный монтажный объём.

Таким образом, выбраны параметры и критерии, а также определена их иерархия для решения задачи оптимизации АИД. Поставлена задача глобальной оптимизации функции девяти вещественных и двух целочисленных переменных.

Следует отметить, что сформулированная задача оптимизации имеет высокую размерность поискового пространства. Как показали решения тестовых задач [4, 5], результат решения сильно зависит от стартовой

точки. Достижение какой-либо величины момента двигателя возможно при различных сочетаниях геометрических размеров. В ряде случаев решение не может быть найдено. Это говорит о множестве локальных минимумов – функция многоэкстремальная. Для решения задач такого типа можем применить комбинированный генетический алгоритм с однотоочечным кроссовером и селекцией по принципу рулетки. Улучшение результата глобальной оптимизации осуществляется методом Нелдера-Мида. Результаты синтеза для различных значений числа зубцов при числе фаз $m=8$ приведены в табл. 1. При других значениях числа фаз решение найдено не было.

Таблица 1

параметр	Значение				Значение			
	31	35	36	38	42	32	33	34
Z	31	35	36	38	42	32	33	34
D_i , м	0,4944	0,4925	0,4928	0,4931	0,4917	0,486	0,4887	0,4933
δ , м	0,001	0,0016	0,0012	0,0011	0,0011	0,0011	0,001	0,0012
α_1	0,448	0,4957	0,3934	0,4115	0,411	0,3552	0,4273	0,4311
α_2	0,4281	0,4507	0,357	0,4244	0,4281	0,3499	0,4683	0,4417
h_{z1} , м	0,0138	0,0112	0,013	0,012	0,011	0,0154	0,0161	0,0138
h_{z2} , м	0,0146	0,0121	0,0144	0,014	0,0113	0,0154	0,0123	0,0159
l_{z1} , м	0,0224	0,0324	0,0372	0,0385	0,0484	0,0244	0,0235	0,0297
l_{z2} , м	0,0243	0,0343	0,0389	0,0375	0,0486	0,0266	0,022	0,0273
B_{δ} , Тл	2,199	2,0734	2,0573	1,9693	1,8704	2,1087	2,1709	2,0396
$M_{дв}$, Нм	4200,011	4200	4200	4200	4262,837	4261,635	4200	4200
U_a , А	4565,609	2649,721	2279,32	1960,962	1566,253	3652,348	3243,101	2745,646

По результатам расчетов выбрано оптимальное значение вектора параметров которое соответствует минимальному значению магнитного напряжения $U_a=1566,253$ А.

Выводы: Для выбора параметров АИД сформулирована задача оптимизации. Определяющим критерием принята величина электромагнитного момента. Определены параметры, критерии и ограничения для оптимизации АИД. При построении последовательности критериев принят иерархический подход. В качестве целевой функции принято магнитное напряжение зубцового слоя.

Установлено, что задача синтеза АИД – задача многокритериальной оптимизации с необходимостью определения глобального оптимума.

В качестве метода глобальной оптимизации выбран генетический алгоритм с последующим уточнением результатов методом Нелдера-Мида.

По результатам расчетов определен оптимальный вектор параметров АИД для скоростного электропоезда.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рябов Е.С. Реактивный индукторный двигатель с аксиальным магнитным потоком // Вісник НТУ "ХПИ". Збірник наукових праць. Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ "ХПИ". – 2010. – №38. – д С. 80-83.
2. Ильинский Н.Ф. Проектирование вентильно-индукторных машин общепромышленного назначения / Ильинский Н.Ф., Штайнбрунн Й., Прудникова Ю.И. // Вестник МЭИ. – № 1. – 2004. – С. 37-43.
3. Рябов Е.С., Любарский Б.Г., Зюзин Д.Ю. Емельянов В.Л. К вопросу определения электромагнитного момента реактивного индукторного двигателя с аксиальным магнитным потоком // Електротехніка і електромеханіка. – 2010. – № 5. С. 27-29.
4. Северин В.П. Структура лаборатории методов оптимизации ОПТЛАВ в системе MATLAB // Труды IV Всероссийской научной конференции "Проектирование инженерных и научных приложений в среде MATLAB". – Астрахань: Из-

дательский дом "Астраханский университет". – 2009. – С. 235-267.

5. В.А. Дзензерский, В.И. Омеляненко, С.В. Васильев и др. Высокоскоростной магнитный транспорт и электродинамической левитацией / В.А. Дзензерский, В.И. Омеляненко, С.В. Васильев, В.И. Матин, С.А. Сергеев. – К.: Наукова думка, 2001. – 479 с.

Поступила 23.10.2010

Северин Валерий Петрович, д.т.н., профессор,
Национальный технический университет
"Харьковский политехнический институт"
Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ",
кафедра системного анализа и управления
тел. (057) 707-66-54,
Любарский Борис Григорьевич, к.т.н., доцент,
Национальный технический университет
"Харьковский политехнический институт"
Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ",
кафедра электрического транспорта и тепловозостроения
тел. (057) 707-65-30, E-mail: lboris@kpi.kharkov.ua
Рябов Евгений Сергеевич,
ГП завод "Электротяжмаш",
Украина, 61089, Харьков, пр. Московский, 299
тел. (0572) 956503, E-mail: ryabov_eugene@mail.ru
Емельянов Вадим Леонидович
Национальный технический университет
"Харьковский политехнический институт"
Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ",
кафедра электрических аппаратов
тел. (057) 707-68-64, E-mail: evl@kpi.kharkov.ua

B.G. Lubarskiy, V.P. Severin, E.S. Ryabov, V.L. Emeljanov
Synthesis of an axial-flux traction jet induction motor for high-speed rolling stock.

A technique for synthesis of a traction jet induction motor with axial magnetic flux for high-speed rolling stock is introduced. The synthesis is performed through solving a multicriterion optimization problem.

Key words – traction jet induction motor, axial magnetic flux, synthesis, multicriterion optimization, high-speed rolling stock.