## Авторы:

Варельджан Грач Эдуардович

студент

Хачемизов Мухамед Асланович

студент

Асфандеров Кемран Бахтиёрович

студент

Юлакаев Эльдар Рустамович

студент

ФГБОУ ВО «Донской государственный

технический университет»

г. Ростов-на-Дону, Ростовская область

## КОСВЕННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ РОТОРА ВИМ С КОРОТКИМ ПОЛЕМ

Аннотация: в статье говорится о косвенном определении положения ротора ВИМ с коротким полем. В настоящее время существует мало описаний алгоритмов определения положения ротора, причиной тому служит магнитная связь между фазами ВИМ. Определение положения ротора ВИМ сводится к математическому моделированию и решению систем уравнений, описывающих ВИМ с коротким полем. В результате чего получается табличная зависимость для ВИМ конфигурации 12/9.

*Ключевые слова*: способ замыкания, магнитный поток, short-flux, короткое поле, ВИМ, ротор ВИМ, система MATLAB/Simulink, математическое моделирование ВИМ.

В отечественной и зарубежной литературе описывается ВИМ, в которой фазные катушки соединены таким образом, чтобы магнитный поток активной фазы замыкался через соседние зубцы статора (рисунок 3.1а). Существует также конфигурация ВИМ с одновременным возбуждением двух фаз (рисунок 1.1б), а также конфигурации с поворотной симметрией 120<sup>0</sup> (рисунок 1.1в). Такой способ

замыкания магнитного потока в зарубежной литературе принято называть short-flux («короткое поле»).



Рис. 1.1. Конфигурации ВИМ с «коротким полем»

Исследования показывают, что при определенных условиях использование такого замыкания магнитного потока, позволяет достичь улучшения механических характеристик [1]. Некоторые из конфигураций позволяют уменьшить уровень пульсаций электромагнитного момента и акустического шума. Таким образом, реализация ВИП на основе ВИМ с коротким полем технически оправдана.

В настоящее время описано мало алгоритмов определения положения ротора для таких конфигураций зубцовой зоны. В качестве основной причины этого можно выделить магнитную связь между фазами ВИМ. Как показано в описании ВИМ с традиционным замыканием магнитного потока принято считать взаимную индуктивность между фазами пренебрежительно малой. При работе ВИМ с «коротким полем» (конфигурации, показанные на рисунках 1.1a и 1.1в) магнитный поток, проходя через зубцы статора неактивных фаз будет изменяться по величине. В результате в фазных обмотках будет индуцироваться ЭДС взаимоиндукции. Это усложняет математическое моделирование ВИМ таких конфигураций, а также синтез алгоритма бездатчикового положения ротора.

С точки зрения математического описания наиболее сложными можно считать конфигурации ВИМ с поворотной симметрией 120<sup>0</sup> [2]. Из рисунка 1.1в видно, что в этом случае следует учитывать магнитную связь всех фаз. Однако, учитывая перспективы и малое количество публикаций, освещающих физические процессы в подобных конфигурациях, бездатчиковое определение положения ротора рассматривается на примере ВИМ с «коротким полем» и поворотной симметрией 120<sup>0</sup> конфигурации12/9.

При математическом описании ВИМ с коротким полем потокосцепление фазы k n-фазной машины можно рассматривать как  $\psi_k = f(i_1, \theta, i_2, ..., i_n)$ . Таким образом, уравнение электрического баланса для фазы ВИМ с коротким полем

$$u_{k} = i_{k} \cdot R + \frac{\partial \psi_{k}}{\partial i_{1}} \cdot \frac{di_{1}}{dt} + \omega \cdot \frac{\partial \psi_{k}}{\partial \theta} + \frac{\partial \psi_{k}}{\partial i_{2}} \cdot \frac{di_{2}}{dt} + \dots + \frac{\partial \psi_{k}}{\partial i_{n}} \cdot \frac{di_{n}}{dt}$$
(3.1)

Для 4-фазной ВИМ конфигурации 12/9 используя уравнение 3.1 можно записать

$$\begin{cases} \frac{di_{1}}{dt} = \frac{1}{\frac{\partial\psi_{1}}{\partial i_{1}}} \left( u_{1} - i_{1} \cdot R - \omega \cdot \frac{\partial\psi_{1}}{\partial \theta} - \frac{\partial\psi_{1}}{\partial i_{2}} \cdot \frac{di_{2}}{dt} - \frac{\partial\psi_{1}}{\partial i_{3}} \cdot \frac{di_{3}}{dt} - \frac{\partial\psi_{1}}{\partial i_{4}} \cdot \frac{di_{4}}{dt} \right) \\ \frac{di_{2}}{dt} = \frac{1}{\frac{\partial\psi_{2}}{\partial i_{2}}} \left( u_{2} - i_{2} \cdot R - \omega \cdot \frac{\partial\psi_{2}}{\partial \theta} - \frac{\partial\psi_{2}}{\partial i_{1}} \cdot \frac{di_{1}}{dt} - \frac{\partial\psi_{2}}{\partial i_{3}} \cdot \frac{di_{3}}{dt} - \frac{\partial\psi_{2}}{\partial i_{4}} \cdot \frac{di_{4}}{dt} \right) \\ \frac{di_{3}}{dt} = \frac{1}{\frac{\partial\psi_{3}}{\partial i_{3}}} \left( u_{3} - i_{3} \cdot R - \omega \cdot \frac{\partial\psi_{3}}{\partial \theta} - \frac{\partial\psi_{3}}{\partial i_{1}} \cdot \frac{di_{1}}{dt} - \frac{\partial\psi_{3}}{\partial i_{2}} \cdot \frac{di_{2}}{dt} - \frac{\partial\psi_{3}}{\partial i_{4}} \cdot \frac{di_{4}}{dt} \right) \\ \frac{di_{4}}{dt} = \frac{1}{\frac{\partial\psi_{4}}{\partial i_{4}}} \left( u_{4} - i_{4} \cdot R - \omega \cdot \frac{\partial\psi_{4}}{\partial \theta} - \frac{\partial\psi_{4}}{\partial i_{1}} \cdot \frac{di_{1}}{dt} - \frac{\partial\psi_{4}}{\partial i_{2}} \cdot \frac{di_{2}}{dt} - \frac{\partial\psi_{4}}{\partial i_{3}} \cdot \frac{di_{3}}{dt} \right) \end{cases}$$
(1.1)

Решение системы уравнений 1.1 затруднено наличием алгебраических петель. В системе MATLAB/Simulink возможно осуществление численного расчета подобных задач, однако, на это требуются значительные затраты времени. Систему уравнений можно упростить с помощью символьных преобразований. В результате будут получены уравнения, решение которых не затруднено алгебраическими петлями. Однако реализация подобного подхода займет значительное количество времени на этапе подготовки компьютерной модели. Кроме того, оба подхода осложняются необходимостью постоянного обращения к массивам данных поисковых таблиц, что также увеличивает время расчета.

Для математического моделирования ВИМ с коротким полем было решено преобразовать исходную поисковую таблицу  $\psi(i_1, \theta, i_2, i_3, i_4)$  в табличную

зависимость *i*<sub>1</sub>( $\psi$ , $\theta$ ,*i*<sub>2</sub>, *i*<sub>3</sub>, *i*<sub>4</sub>). В этом случае для ВИМ конфигурации 12/9 можно записать систему уравнений

$$\begin{aligned}
\psi_{1} &= \int (u_{1} - i_{1} \cdot R) dt \\
i_{1} &= f(\psi_{1}, \theta, i_{2}, i_{3}, i_{4}) \\
\psi_{2} &= \int (u_{2} - i_{2} \cdot R) dt \\
i_{2} &= f(\psi_{2}, \theta, i_{3}, i_{4}, i_{1}) \\
\psi_{3} &= \int (u_{3} - i_{3} \cdot R) dt \\
i_{3} &= f(\psi_{3}, \theta, i_{4}, i_{1}, i_{2}) \\
\psi_{4} &= \int (u_{4} - i_{4} \cdot R) dt \\
i_{4} &= f(\psi_{4}, \theta, i_{1}, i_{2}, i_{3})
\end{aligned}$$
(1.2)

В случае  $\omega = const$  предварительно определив зависимость  $\theta(t)$  из уравнения 1.2 можно осуществить итерационный расчет до достижения необходимой точности результатов двух соседних итераций. При необходимости моделирования ситуации  $\omega \neq const$  возможно отдельное решение дифференциальных уравнений, описывающих динамику ВИП. Затем при обновленной зависимости  $\theta(t)$  снова решается система уравнений (1.2). Расчет повторяется до момента, когда разность зависимостей  $\theta(t)$  двух соседних итераций пренебрежимо мала.

Следует уточнить, что при преобразовании исходных данных необходимо учитывать алгоритм интерполяции значений тока, а также насыщение магнитопровода ВИМ. Для получения табличных данных при проведении полевых расчетов в качестве максимального значения тока следует принимать такое *i*, для которого рассогласованному положению соответствует состояние глубокого насыщения магнитопровода.

Табличная зависимость  $\psi_a(i_a, \theta, i_b, i_c, i_d)$  для ВИМ конфигурации 12/9 (рисунок 1.2) была получена в комплексе расчетов методом конечных элементов FEMM с использованием скрипта, написанного на языке Lua.



Рис. 1.2. Табличная зависимость  $\psi_a(i_a, \theta, i_b, i_c, i_d)$ 

## Список литературы

1. G.J. Li, J. Ojeda, E. Hoang, M. Lecrivain, M. Gabsi. Comparative studies between classical and mutually coupled switched reluctance motors using thermal-electromagnetic analysis for driveng cycles // IEEE Transaction on Magnetics, №47, p. 839–847, 2011.

Петрушин А.Д. Реактивная коммутируемая электрическая машина с поворотной симметрией: Патент на изобретение РФ №2450410 / А.Д. Петрушин, Н.В. Гребенников. – 2011.