

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крокко, Л. Одномерное рассмотрение газовой динамики установившихся течений // Основы газовой динамики / Л. Крокко. Пер. с англ. М.: ИЛ, 1963. С. 64–324.
2. Абрамович, Г. Н. Прикладная газовая динамика: учебное руководство / Г. Н. Абрамович. В 2-х ч. Ч. 1. 5-е изд., перераб и доп. М.: Наука, 1991. 600 с.
3. Виноградов, Б. С. Некоторые модификации газодинамических функций полного импульса / Б. С. Виноградов // Тр. Казанск. авиац. ин-та. Казань: КАИ, 1971. Вып. 133. С. 17–23.
4. Черный, Г. Г. Газовая динамика / Г. Г. Черный. М.: Наука, 1988. 424 с.
5. Вулис, Л. А. Термодинамика газовых потоков / Л. А. Вулис. М.: Госэнергоиздат, 1959. 320 с.
6. Крымасов, Н. Н. Газодинамические течения в каналах при наличии теплообмена / Н. Н. Крымасов // Тр. ЦАГИ. 1973. Вып. 1443. 64 с.

ОБ АВТОРАХ



Гимранов Эрнет Гайсович, проф. каф. прикладной гидромеханики. Дипл. инж.-мех. по авиац. двигателям (УАИ, 1965). Д-р техн. наук по тепловым двигателям (УАИ, 1990). Иссл. в обл. газовой динамики двигателей.



Михайлов Валерий Германович, проф. каф. основ констр. механизмов и машин. Дипл. инж.-мех. по гидравлич. машинам (УАИ, 1985). Д-р техн. наук по тепловым двигателям (УГАТУ, 1999). Иссл. в обл. газовой динамики двигателей.

УДК 621.313.282.2, 621.3.082.4

Ф. Р. ИСМАГИЛОВ, Р. Р. САТТАРОВ, А. В. ТРОФИМОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ВИБРАЦИОННЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований электромагнитных процессов в вибрационных электромеханических преобразователях. Получена математическая модель вибрационного преобразователя, позволяющая определить статические тяговые характеристики при учете нелинейности магнитной системы. Проведены экспериментальные исследования магнитного поля и электромагнитной силы, результаты которых подтверждают достоверность полученной математической модели. *Вибрационные электро-механические преобразователи; электромагнитные вибраторы; электромагнитные процессы; нелинейные магнитные системы*

В настоящее время существует широкий класс линейных электрических машин возвратно-поступательного движения, в том числе ударного действия. Область применения линейных электрических машин чрезвычайно широка — от реле в системах автоматики до катапульты при запуске самолетов и космических объектов. Наиболее широкое распространение получили линейные асинхронные преобразователи, принцип действия которых подобен принципу действия асинхронных двигателей с немагнитным проводящим полым ротором. В то же время, когда необходимы высокая надежность и постоянство скорости движения, широко применяются бесконтактные синхронные машины [1].

Разработка новых конструкций линейных электрических машин интенсивно продолжается. Специальный класс электромеханических преобразователей составляют линейные преобразователи возвратно-поступательного движения [1]. В настоящей работе рассматриваются электромагнитные процессы в линейных преобразователях, которые могут служить для возбуждения вибраций в агрессивных средах [2, 3]. Кроме того, та-

кие преобразователи могут быть использованы как основной элемент устройства для перемещения вдоль линии электропередачи [4]. При этом возможен режим безударных или ударных колебаний, когда вибрационное движение инерционного элемента перемежается следующими один за другим ударами.

Статические тяговые характеристики известных электромагнитных вибраторов могут меняться в широких пределах путем изменения формы полюсов и их конструктивного исполнения [5]. При большом ходе якоря (до 100 мм) применяются броневые, а при малом ходе якоря (до 10 мм) — преимущественно клапанные магнитные системы. В броневом электромагните по сравнению с клапанным создается дополнительная сила за счет потоков рассеяния. Благодаря этой особенности броневые электромагниты используются в тех случаях, когда требуется развить относительно большое и практически постоянное усилие при большом ходе. В броневых электромагнитах перемещение является поперечным по отношению к магнитному полю, в то время как в клапанных — продольным [5].

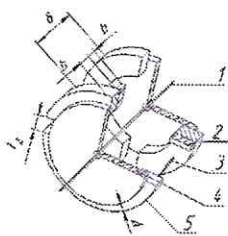


Рис. 1. Конструкция вибрационного электро-механического преобразователя

Исследуемые вибрационные электромеханические преобразователи (ВЭП) состоят из двух одинаковых подвижных рабочих частей (рис. 1), каждая из которых представляет собой пару полукольца из ферромагнитного материала 5, с зазором между ними и размещенных на шине с переменным током 1. Эти части скреплены шайбами из немагнитного материала 4. Между рабочими частями существует упругая связь 3.

Статические характеристики такого преобразователя аналогичны характеристикам электромагнитов с движением вдоль силовых линий поля (клапанные электромагниты) и представляют собой сильно убывающую зависимость электромагнитной силы от зазора между подвижными частями [2]. В ряде случаев для увеличения размаха амплитуды и скорости вибраций необходимо обеспечить тяговые характеристики, аналогичные броневым электромагнитам с практически постоянной силой. В этом случае добавляются магнитные зубцы 2, по высоте равные ширине полукольца b , расположенные по середине полукольца с одной стороны, причем ширина выступа l_2 близка к величине зазора между полукольцами l_2 . При этом амплитуда вибраций будет определяться высотой выступа b [3]. Таким образом, возможны две конструкции вибрационных преобразователей: с выступом и без него, что соответствует ВЭП с поперечным и продольным перемещением по отношению к линиям магнитного поля.

При протекании переменного тока по шине между рабочими частями преобразователя возникает переменная сила притяжения, изменяющая свое значение от нуля до максимального. Рабочие части вибратора начинают сближаться, сила притяжения между ними нарастает, одновременно увеличивается сила противодействия упругой связи. В определенный момент сила притяжения начнет уменьшаться, и когда сила упругой связи превысит силу притяжения, рабочие части возвратятся в исходное положение. Далее, сила притяжения снова начнет возрастать, и цикл повторится снова.

Использование предлагаемых вибрационных преобразователей обеспечивает следующие преимущества по сравнению с известными конструктивными исполнениями [2, 3]:

1) Отсутствие необходимости в обмотке возбуждения, так как ее роль выполняет линия электропередачи.

2) Снижение материалоемкости на изготовление и отсутствие дорогих комплектующих.

3) Низкая себестоимость и высокая технологичность конструкции.

Расчет электромагнитного поля преобразователя и его параметров может быть осуществлен либо непосредственно методами теории поля (полевые методы), либо методами теории цепей, вытекающими из теории поля [6]. Поле подавляющего большинства магнитных систем электро-механических преобразователей трехмерно. Расчет трехмерных полей полевыми методами обычно связан со значительными объемами вычислительных работ. Методы теории цепей обладают относительной простотой и обеспечивают достаточную точность.

При рассмотрении магнитного поля в электромеханических преобразователях принимаются следующие допущения:

1) МДС провода считается постоянной, т. е. не зависит от положения подвижных частей ВЭП.

2) Все величины считаются изменяющимися по гармоническому закону.

3) Поля выпучивания незначительны.

4) Область рабочего воздушного зазора рассматривается как часть якоря, отличающаяся только магнитной проницаемостью.

Целесообразно построить математическую модель ВЭП с поперечным перемещением относительно поля, т. е. конструкции с выступом, так как математическая модель преобразователя без выступа (зубца) может быть получена как частный случай.

Второе допущение соответствует методу эквивалентных синусоид [5]. В соответствии с этим методом сопротивления магнитных участков будут комплексными и нелинейно зависящими от магнитного потенциала или магнитного потока на данном элементе. Комплексное магнитное сопротивление участка стали, соответствующего пазу, определяется как [5, 6]

$$Z_2 = \frac{l_2}{\mu l_0 S} = (\rho_{MR} + j\rho_{MX}) \frac{l_2}{S}, \quad (1)$$

где $\mu = \frac{B}{\mu_0 H}$ — относительная комплексная магнитная проницаемость; ρ_{MR} , ρ_{MX} — удельные магнитные сопротивления; l_2 — длина магнитной линии в пазах; $S = \Delta \cdot b$ — площадь поперечного сечения; Δ — ширина кольца; b — толщина кольца.

Аналогично, магнитное сопротивление участка стали, соответствующего воздушному зазору, определяется по формуле

$$Z_1 = \frac{l_1}{\mu l_0 S} = (\rho_{MR} + j\rho_{MX}) \frac{l_1}{S}, \quad (2)$$

где l_1 — полудлина кольца без паза.

Сопротивления, соответствующие немагнитным участкам, линейные и вещественные. При пренебрежении полями выпучивания магнитное сопротивление паза определяется как

$$R'_\pi = \frac{l_1}{\mu_0 \delta \Delta}, \quad (3)$$

а магнитное сопротивление половины рабочего воздушного зазора

$$R_{\delta} = \frac{2\delta}{\mu_0 l_2 \Delta}. \quad (4)$$

Магнитное сопротивление выступа (2 на рис. 1)

$$Z_z = (\rho_{MR} + j\rho_{MX}) \frac{l'_2}{(b-\delta)\Delta}, \quad (5)$$

где $l'_2 = l_2 - 2\delta_1$ — длина зубца; δ_1 — зубцовый зазор. Магнитное сопротивление воздушного зазора

$$R_{\delta_1} = \frac{\delta_1}{\mu_0(b-\delta)\Delta}. \quad (6)$$

При составлении схемы замещения необходимо учесть, что рассматриваемое устройство обладает симметрией, следовательно, потоки в одинаковых частях разных колец должны быть равными. Схема замещения магнитной цепи, где воздушный зазор замещен сосредоточенными сопротивлениями, представлена на рис. 2. Источники МДС могли бы быть введены и в других ветвях, необходимо лишь, чтобы выполнялся закон полного тока [6].

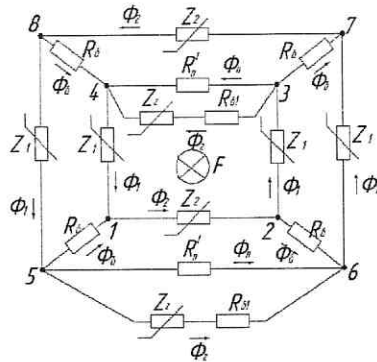


Рис. 2. Схема замещения преобразователя с зубцами

Схема замещения преобразователя без выступа будет проще, так как в ней будут отсутствовать сопротивления зубца и дополнительного воздушного зазора, а сопротивление паза не будет зависеть от перемещения колец.

В соответствии с аналогиями законов Кирхгофа для магнитных цепей по схеме замещения может быть составлена следующая система нелинейных дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{\Phi}_{\delta} + \dot{\Phi}_1 - \dot{\Phi}_2 &= 0; \\ \dot{\Phi}_1 - \dot{\Phi}_{\delta} - \dot{\Phi}_n - \dot{\Phi}_z &= 0; \\ 2\dot{\Phi}_1 Z_1 (\dot{\Phi}_1) + \dot{\Phi}_2 Z_2 (\dot{\Phi}_2) + \dot{\Phi}_n R'_n &= \dot{F}; \\ \dot{\Phi}_n R'_n - 2\dot{\Phi}_{\delta} R_{\delta} - \dot{\Phi}_2 Z_2 (\dot{\Phi}_2) &= 0; \\ \dot{\Phi}_n R'_n - \dot{\Phi}_z R_{\delta_1} - \dot{\Phi}_z Z_z (\dot{\Phi}_z) &= 0. \end{aligned} \quad (7)$$

В общем случае полученная система уравнений может быть решена только численно на ЭВМ.

В качестве начального приближения можно принять решение, полученное при постоянной магнитной проницаемости, соответствующей линейному участку характеристики намагничивания,

$$\dot{\Phi}_2 = \dot{F} / Z_{\text{эКВ}}. \quad (8)$$

Здесь эквивалентное сопротивление

$$Z_{\text{эКВ}} = Z_1 + Z_2 + \frac{(R_{\delta} + Z_2)(R'_n + (1+r)Z_1)}{R'_n + (1+r)R_{\delta}}, \quad (9)$$

где $r = R'_n / (Z_z + R_{\delta_1})$. Потоки через остальные элементы схемы замещения будут следующими:

$$\dot{\Phi}_{\delta} = \frac{\dot{\Phi}_2 R'_n - (1+r)Z_2}{2 R'_n + (1+r)R_{\delta}}; \quad (10)$$

$$\dot{\Phi}_n = \dot{\Phi}_2 \frac{R_{\delta} + Z_2}{R'_n + (1+r)R_{\delta}}; \quad \dot{\Phi}_z = \dot{\Phi}_n \frac{R'_n}{Z_z + R_{\delta_1}}. \quad (11)$$

По полученным выражениям могут быть составлены алгоритмы расчетов потоков в исследуемых преобразователях. Для решения необходимо получить зависимости комплексной магнитной проницаемости или составляющих комплексного удельного магнитного сопротивления от величины поля. Эти зависимости могут быть взяты для известных материалов из справочной литературы или получены экспериментально для используемого материала с помощью известных методов [5]. Для этого необходимо изготовить сплошное кольцо из исследуемого ферромагнитного материала, на которое наматывается катушка. Измеряя ток в катушке и ЭДС, можно определить модуль полной магнитной проводимости. Определяя суммарные потери в стали кольца, можно получить реактивную составляющую магнитного сопротивления, а затем вычислить его активную составляющую [5]. Полученные характеристики необходимо интерполировать и ввести в ЭВМ. В современных математических пакетах существуют стандартные процедуры интерполяции опытных данных.

Следующий шаг заключается во вводе в принятой форме нелинейной системы (7), из решения которой определяются потоки во всех элементах магнитной цепи. Эта система может быть решена численно с помощью готовых процедур, например, в пакете MathCAD реализованы методы сопряженных градиентов и Левенберга. В качестве начального приближения целесообразно использовать решение (8)–(11), полученное без учета насыщения.

Ряд проведенных расчетов показывает, что поток через зубцовый зазор значительно меньше потока через рабочий воздушный зазор. Пазовый поток рассеяния значительно меньше потоков через воздушные зазоры. При увеличении тока насыщение магнитной цепи значительно уменьшает основной рабочий поток, в то время как в зубце поток практически не изменяется. Таким образом, при расчете вибрационных преобразователей необходимо учитывать нелинейные характеристики магнитного материала, так как рассчитанный в линейном приближении поток через

основной рабочий зазор может превышать рассчитанный с учетом нелинейности характеристик почти в 2 раза.

Электромагнитная сила может быть определена по изменению магнитной энергии или коэнергии [6]. В условиях постоянства токов всех возбуждающих контуров или катушек при перемещении подвижного элемента сила находится по изменению магнитной коэнергии:

$$f_{эм}(i, \delta) = \left. \frac{\partial W_{co}(i, \delta)}{\partial \delta} \right|_{i=const}, \quad (12)$$

где i — ток в катушке; δ — координата подвижной части (воздушный зазор); $W_{co}(i, \delta) = \sum_{k=1}^n W_{co k}(i, \delta)$ — суммарная коэнергия, запасаемая во всех элементах магнитной цепи.

При изменении всех величин по гармоническому закону из (12) можно получить следующее выражение для мгновенного значения силы:

$$f(t) = f_{cp}(1 + \cos 2\omega t). \quad (13)$$

Среднее значение электромагнитной силы за период может быть вычислено по действующему значению потока

$$f_{cp}(I, \delta) = - \sum \frac{|\dot{\Phi}_\delta|^2}{2} \frac{\partial R_\delta}{\partial \delta}. \quad (14)$$

Здесь суммирование производится по всем элементам, соответствующим рабочим воздушным зазорам.

В линейном вибрационном преобразователе с зубцом электромагнитная сила будет связана с изменением при перемещении магнитной проводимости рабочего воздушного зазора, паза и зубцового зазора. Кроме того, изменяется объем магнитной системы из-за наличия зубца, однако этим изменением при расчете электромагнитных сил можно пренебречь [5].

Тогда среднее значение силы определится как

$$f_{cp} = - \left[2|\dot{\Phi}_\delta|^2 \frac{\partial R_\delta}{\partial \delta} + |\dot{\Phi}_z|^2 \frac{\partial R_{\delta_1}}{\partial \delta} + |\dot{\Phi}_n|^2 \frac{\partial R_n}{\partial \delta} \right]. \quad (15)$$

С учетом выражений для магнитных сопротивлений (1)–(6) для электромагнитной силы может быть получено

$$f_{cp} = -[f_{эм1} + f_{эм2} - f_{эм3}], \quad (16)$$

$$\text{где } f_{эм1} = 2 \left| \dot{\Phi}_\delta \right|^2 \frac{R_\delta}{\delta}; \quad f_{эм2} = \left| \dot{\Phi}_z \right|^2 \frac{R_{\delta_1}}{b-\delta}; \quad f_{эм3} = \left| \dot{\Phi}_n \right|^2 \frac{R'_n}{\delta}.$$

Выражение (15) показывает, что в случае наличия зубцов электромагнитная сила состоит из трех составляющих: двух составляющих, стремящихся притянуть кольца, и составляющей, отталкивающей кольца преобразователя. Первая составляющая притягивающей силы $f_{эм1}$ соответствует

изменению воздушного зазора δ , а вторая $f_{эм2}$ — изменению зубцового воздушного зазора δ_1 . Первая составляющая $f_{эм1}$ весьма значительна при малом зазоре δ , но быстро убывает при его возрастании. Вторая составляющая $f_{эм2}$ обусловлена наличием зубца и при принятых допущениях не зависит от положения колец. При малых величинах зазора δ основной является составляющая $f_{эм1}$, а при больших — $f_{эм2}$. Третья отталкивающая составляющая $f_{эм3}$ также обусловлена наличием выступа, однако из-за большого магнитного сопротивления паза ($l_1 > \delta_1$) этой составляющей часто можно пренебречь.

В ВЭП без зубцов электромагнитная сила определяется только изменением зазора и соответственно равна $f_{эм1}$, в которой, однако, магнитные потоки определены по упрощенной схеме замещения для преобразователя без зубцов.

Алгоритм расчета электромагнитной силы в общем случае будет включать следующие шаги:

- 1) Ввод исходных данных (геометрических размеров, МДС).
- 2) Ввод характеристик намагничивания и их интерполяция.
- 3) Расчет магнитных потоков в линейном приближении.
- 4) Решение нелинейной системы уравнений для магнитных потоков.
- 5) Расчет среднего значения электромагнитной силы.

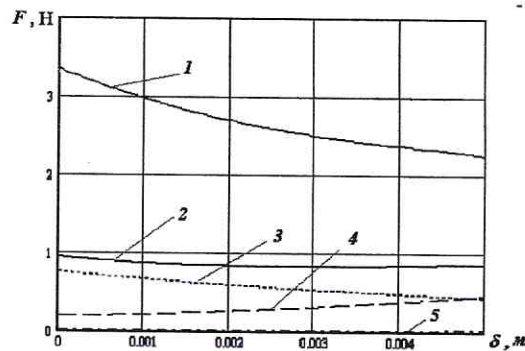


Рис. 3. Зависимость силы от положения якоря ($I = 200 \text{ A}$)

На рис. 3 показаны типичные зависимости среднего значения электромагнитной силы от воздушного зазора (тяговые характеристики). На этих рисунках кривая 1 — значение силы, вычисленной в линейном приближении, кривая 2 — с учетом нелинейных характеристик. Видно, что сила определенная, в линейном приближении, существенно превышает силу, определенную с учетом насыщения. Кроме того, представлены отдельные составляющие силы, определенной с учетом насыщения: кривая 3 — $f_{эм1}$, кривая 4 — $f_{эм2}$, кривая 5 — $f_{эм3}$. Приблизительно можно считать, что кривая 3 одновременно представляет статическую тяговую характеристику для преобразователя без зубцов. При сравнении кривой 3 с кривой 2 (преобразователь с зубцом) видно, что электромагнитная сила может быть на 20–40% больше при наличии

зубца. В вибрационном преобразователе с зубцом электромагнитная сила всегда больше, чем в преобразователе без зубца.

Из результатов расчетов следует, что при определении электромагнитной силы нелинейной зависимостью можно пренебречь лишь при относительно небольших токах (до 150 А при использовании электротехнической стали с индукцией насыщения 1,8 Тл). При больших токах ошибка при определении силы по линейному приближению может составлять 100 %. Если в линейном приближении сила убывает с увеличением зазора, то при учете насыщения сила при некоторых значениях тока в проводе практически постоянна (для исследуемого экспериментально образца при I от 50 до 200 А). При больших токах сила с увеличением зазора возрастает, что объясняется уменьшением насыщения магнитной цепи с ростом зазора. При малых токах в проводе характеристики магнитного материала линейны и зависимость от зазора носит типичный для электромагнитов убывающий характер. Таким образом, в ВЭП с зубцом может быть получена электромагнитная сила, практически не зависящая от рабочего воздушного зазора в широком диапазоне изменений последнего.

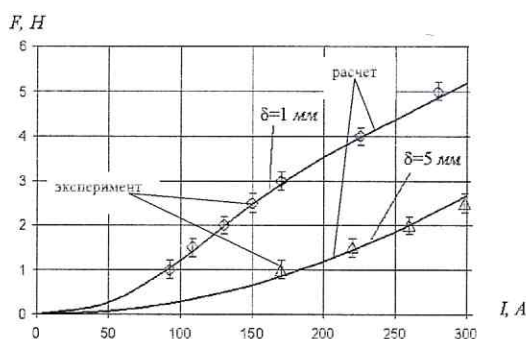


Рис. 4. Экспериментальные и теоретические характеристики линейного преобразователя с зубцами

Для проверки точности полученной математической модели были проведены экспериментальные исследования магнитного поля и электромагнитной силы. Экспериментальный образец имел следующие геометрические размеры: $D_1 = 60$ мм; $D_2 = 22,5$ мм; $b = 4$ мм; $l_1 = 5,5$ мм и был выполнен из конструкционной стали. В опытах по определению электромагнитной силы одно кольцо было зафиксировано неподвижно на проводе, другое подвижное кольцо было закреплено таким образом, что могло двигаться только к неподвижному кольцу. Это кольцо было нагружено через систему блоков определенной массой. В опытах были использованы эталонные разновесы, кратные 50 г. Ток в проводе плавно увеличивался от нуля до момента трогания подвижного кольца. Таким образом, были получены зависимости тока в проводе от величины силы (рис. 4). На рис. 4 представлены зависимости силы от тока при постоянном воздушном зазоре, рассчитанные для исследуемого образца и для сопоставления результатов экспериментальных измерений. Из этих кривых сле-

дует, что расчетный алгоритм дает приемлемые по точности результаты с относительной погрешностью не более 10%.

В работе представлены результаты теоретического и экспериментального исследования вибрационных электромеханических преобразователей с продольным и поперечным перемещением. Получены математические модели электромагнитных процессов в таких преобразователях, позволяющие рассчитать электромагнитную силу для любого положения подвижных частей преобразователя с учетом нелинейности магнитных характеристик. Результаты экспериментального исследования ВЭП показывают, что полученные из математических моделей расчетные алгоритмы дают удовлетворительные для инженерной практики по точности результаты, так как их расхождение составляет не более 10%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хитерер, М.Я. Синхронные электрические машины возвратно-поступательного движения / М.Я. Хитерер, И.Е. Овчинников. СПб.: КОРОНА принт, 2004. 368 с.
2. Пат. РФ № 2247464. Электромагнитный вибратор / Ф. Р. Исмагилов, И. Х. Хайруллин, Р. Р. Саттаров, А. В. Трофимов, Т. Р. Терегулов. Оpubл. 27.02.2005. Бюл. № 6.
3. Пат. РФ № 2251196. Электромагнитный вибратор / Ф. Р. Исмагилов, И. Х. Хайруллин, Р. Р. Саттаров, А. В. Трофимов, Е. А. Полихач. Оpubл. 27.04.2005. Бюл. № 12.
4. А. с. РФ. Устройство для очистки проводов линий электропередач / И. Х. Хайруллин, Ф. Р. Исмагилов, Т. И. Хайруллин, Р. Ф. Исмагилов. МКИ H 02 G 7/16. Оpubл. 27.11.99. Бюл. № 33.
5. Иванов, В.Л. Теория электрических аппаратов: учебник для вузов по спец. «Электрические аппараты» / Г. П. Александров, В. В. Борисов, В. Л. Иванов и др. М.: Высш. шк., 1985. 312 с.
6. Иванов-Смоленский А.В. Электромагнитные силы и преобразование энергии в электрических машинах / А. В. Иванов-Смоленский. М.: Высшая школа, 1989. 312 с.

ОБ АВТОРАХ



Исмагилов Флор Рашитович, проф., зав. кафедрой электромеханики, проректор УГАТУ. Дипл. инж.-электромеханик (УАИ, 1973). Д-р техн. наук по элементам и устройствам управления (УГАТУ, 1998). Тр. в обл. электромеханических преобразователей энергии.



Сагтаров Роберт Радилович, доцент той же кафедры. Дипл. физик-геофизик (БГУ, 1996). Канд. техн. наук по элементам и системам управления (УГАТУ, 1999). Иссл. в обл. электромеханических преобразователей энергии.

Трофимов Алексей Викторович, ст. преп. той же кафедры. Дипл. инж.-электромех. (УГАТУ, 2000). Иссл. в обл. электромеханических преобразователей энергии.

УДК 621.313.1.004.58

И. Х. ХАЙРУЛЛИН, Д. Ю. ПАШАЛИ

ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПО ВНЕШНЕМУ МАГНИТНОМУ ПОЛЮ

Рассматриваются вопросы диагностики электромеханических преобразователей по внешнему магнитному полю. Обсуждаются полученные результаты, в том числе диагностические признаки и особенности практического применения метода. *Электромеханический преобразователь; диагностика; внешнее магнитное поле*

Электрические машины используются в приводах практически во всех областях техники и технологического оснащения производства. Их внезапная остановка или внезапный отказ сопровождаются значительными экономическими потерями. Особенно велики потери на крупных энергетических установках и объектах, поэтому техническая диагностика в этой области достаточно развита и является обязательной для предупреждения отказов и своевременного ремонта. Значительно меньшее внимание уделяется диагностике энергетических установок средней и малой мощности, однако их значимость, ввиду развития автономных приводов и массовости последних, постоянно возрастает. Диагностика в основном [1, 2] осуществляется тепловым, электрическим и виброакустическим методами, которые в определенных ситуациях, таких как низкие температуры, виброакустические помехи и т.д., не применимы или не обеспечивают необходимой достоверности информации. Решение современных задач диагностики требует привлечения принципиально новых методов и средств, к ним можно отнести диагностирование по картине внешнего магнитного поля (ВМП). При этом измеряется бесконтактным методом и, что важно, в рабочем режиме. Использование ВМП в качестве как основного, так и дополнительного источника диагностической информации позволяет более достоверно оценить техническое состояние и прогнозировать отказы электрических машин. Несмотря на очевидные достоинства, характеристики ВМП как диагностического параметра мало изучены и практически не используются при оценке технического состояния электромеханических преобразователей (ЭМП), поэтому развитие теории и технических средств диагностики по внешнему магнитному по-

лю является актуальной научно-технической задачей. Следовательно, необходима разработка математических моделей, в частности, для наиболее распространенных преобразователей — асинхронных двигателей и ЭМП с распределенной вторичной системой, а также разработка диагностических устройств для определения технического состояния ЭМП по внешнему магнитному полю.

ВНЕШНЕЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ВТОРИЧНОЙ СИСТЕМОЙ

В целях исследования и диагностики ЭМП с распределенной вторичной системой с магнитной несимметрией поперечного сечения активной части можно представить в виде модели со смещенными осями внутреннего и наружного магнитопроводов. Для данного варианта разработана математическая модель при следующих допущениях: величина немагнитного зазора намного меньше радиуса его кривизны; электромагнитное поле в зазоре плоскопараллельное; первичное поле вне индуктора отсутствует; магнитная проницаемость немагнитного зазора равна проницаемости вакуума; на наружной поверхности отсутствуют концентраторы магнитного поля (выступы и пазы).

Система цилиндрических координат неподвижна относительно вращающегося ротора. С учетом принятых допущений из уравнений Максвелла для медленно движущихся тел могут быть получены три системы исходных уравнений в виде, удобном для аналитического решения. По методу двух реакций наведенное во вторичной системе магнитное поле раскладывается по поперечной и продольной осям. Постоянные интегрирования определяются из граничных условий: