

Обзор и анализ интегральных характеристик для оценки функционального состояния электромагнитов

А.К. Землякова, Е.Р. Кайгородова, А.Н. Парыкин, Н.Е. Макеев, Н.Г. Кулев

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, Новочеркасск

Аннотация: Тренд на миниатюризацию и снижение материалоемкости современных электротехнических изделий переменного тока предъявляет повышенные требования к качеству их отдельных элементов. Все электротехнические изделия переменного тока (электромагниты, электромагнитные реле, двигатели) имеют подвижную и неподвижную части магнитопровода и как минимум одну рабочую катушку. В ходе эксплуатации электротехнических изделий переменного тока в рабочей катушке протекает ток, создается рабочий магнитный поток в неподвижной части магнитопровода, приводящий в движение подвижную его часть. Величина магнитного потока определяется конструкцией, взаимным расположением частей магнитопровода и рабочей катушки, а также количеством витков в ней и величиной протекающего тока. В течение рабочего цикла электротехнических изделий переменного тока подвижная часть магнитопровода перемещается относительно неподвижной, что также приводит к изменению магнитного потока. Требуется знать их механические, электрические и магнитные свойства. Каждая группа показателей требует применения своих методов и средств испытания электротехнических изделий переменного тока. Данная ситуация стимулирует поиск интегральных характеристик электротехнических изделий переменного тока, позволяющих сделать выводы о качестве отдельных частей и эксплуатационных свойствах всего изделия. В статье предлагается в качестве интегральной характеристики электромагнита использовать вебе-амперную характеристику рабочего цикла. Для получения вебер - амперной характеристики электротехнических изделий переменного тока необходимо воздействовать на магнитопровод внешним изменяющимся магнитным полем и измерять специальным сенсором возникающий в его сечении магнитный поток. При определении вебер - амперной характеристики рабочего цикла испытанию подвергается электротехнические изделия переменного тока в собранном виде, что делает невозможным использование сенсоров магнитного потока. Поэтому применение существующих методов измерения не представляется возможным, в связи с чем также необходима разработка метода определения вебер - амперной характеристики рабочего цикла электротехнических изделий переменного тока, обладающего приемлемой точностью и не требующего использования дополнительных сенсоров.

Ключевые слова: электромагниты, интегральные характеристики, оценка функционального состояния, магнитные измерения.

Введение

В настоящее время сфера электротехники развивается широкими темпами. Основными объектами, отвечающими за работу сложных мехатронных систем, являются электротехнические изделия переменного тока (ЭИПТ), такие, как, например, электромагниты, электродвигатели, реле

и т.п. В качестве объекта исследования выбран электромагнит, так как в настоящее время именно этот вид ЭИПТ активно внедряется в различные области науки и техники. Современные требования к точности, быстродействию, миниатюризации, а также к энергоэффективности электромагнитов нуждаются в постоянном совершенствовании методов контроля и диагностики, включая применение новых методик [1], для технологического процесса производства.

Целью является определение наиболее информативных интегральных характеристик электротехнических изделий переменного тока для эффективного контроля в процессе производства и диагностики в процессе эксплуатации [2].

Электромагниты как объект исследования

Рассмотрим подробнее ЭИПТ на примере электромагнита, его эксплуатационные характеристики и особенности с точки зрения процесса контроля их работоспособности [3, 4].

Электромагниты – это электротехнические изделия, позволяющие создавать в определенном месте пространства магнитное поле при помощи рабочей катушки под действием электрического тока [5,6]. Электромагнитные приводы различаются по области применения, конструкции, и, следовательно, по параметрам и характеристикам. В связи с этим, разделение электромагнитов на классы позволяет тщательнее изучить процессы, происходящие в них при работе.

Наиболее распространённые виды электромагнитов отражены на рисунке 1. Учитывая большое разнообразие электромагнитных приводов, они состоят из одинаковых базовых частей:

- намагничивающие обмотки (электромагнитный привод может иметь как одну, так и несколько обмоток) 1;
- ферромагнитный корпус (неподвижная часть магнитопровода) 2;

– якорь (подвижная часть магнитопровода) 3.

В ряде случаев корпус электромагнитного привода может состоять из нескольких частей (фланцев, основания, втулки).

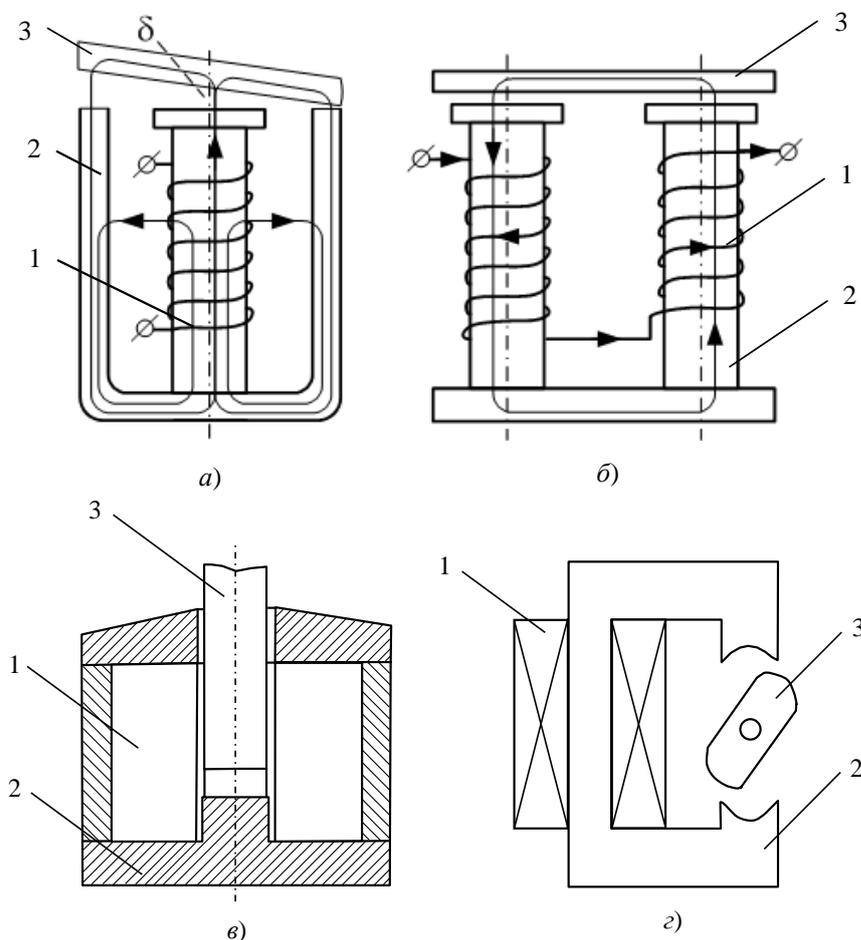


Рис. 1. – Наиболее распространенные виды электромагнитных приводов.

Между подвижной и неподвижной частями магнитопровода присутствуют рабочий δ и паразитный зазоры, что является основным приводимым в движение (под действием электромагнитного поля) механизм электромагнитного привода.

Процесс работы электромагнитного привода может быть выражен, приведенной на рисунке 2, структурной схемой (ГОСТ 19264-1982). Проанализировав структурную схему работы электромагнита, можно сделать вывод, что составляющие её элементы могут быть отражены нелинейными

характеристиками, которые усложняют дальнейшие исследования электромагнитов.



Рис. 2. – Обобщенная структурная схема процесса работы электромагнита.

Обзор и анализ основных характеристик электромагнитов

Различают следующие типичные виды статических тяговых характеристик наиболее распространенных конструктивных форм электромагнитов [7]:

1. Гиперболический вид. Его имеют электромагниты, у которых поток рассеяния (не проходящий через рабочий воздушный зазор и через якорь) не создает силы.

2. Седлообразный вид. Его имеют электромагниты, у которых возникает дополнительная сила, создаваемая потоком рассеяния (не проходящим через рабочий воздушный зазор, но проходящим через рабочий воздушный зазор, и проходящим через часть якоря). Это происходит в том случае, когда якорь втягивается внутрь катушки.

3. Л-образный вид с максимумом у средней части катушки. Он присущ электромагнитным приводам, состоящим из неподвижной части магнитопровода и подвижной, втягиваемой внутрь рабочей обмотки, его также имеют короткоходные электромагнитные приводы с разомкнутой магнитной цепью, у которых подвижная часть магнитопровода втягивается внутрь рабочей обмотки, а также электромагнитные приводы перпендикулярно направленного действия.

4. Константный вид. Его имеют длинноходные электромагнитные приводы с разомкнутой или замкнутой магнитной цепью, якорь которых втягивается внутрь рабочей обмотки. Подобную характеристику имеют электромагниты переменного тока – трехфазные (с тремя катушками) с Ш-образным ярмом и якорем. Особенностью этих электромагнитов является отсутствие вибрации якоря.

Процессы, происходящие в электромагните, описываются уравнениями [5, 8]:

1. Уравнение цепи рабочей катушки электромагнитного привода:

$$U = IR + \frac{d\psi}{dt}, \quad (1)$$

где U – напряжение в рабочей катушке; I – ток, протекающий в рабочей катушке; R – активная составляющая сопротивления рабочей катушки; $\frac{d\psi}{dt}$ – скорость изменения потокосцепления ψ , пронизывающего рабочую катушку, за время t .

Уравнение (1) позволяет проанализировать первую стадию энергетических преобразований в электромагнитном приводе – процесса преобразования электрической энергии в энергию магнитного поля.

2. Уравнение описывающее вебер-амперную характеристику электромагнитного привода связывает ток в обмотке I , потокосцепление Ψ и рабочий зазор δ :

$$\psi = f_2(I, \delta) \quad (2)$$

Эта характеристика сильно зависит от магнитных свойств материала магнитопровода.

Форма вебер-амперной характеристики электромагнитного привода и ее изменения при перемещении подвижной части магнитопровода отражают

преобразование действующей в данный момент электромагнитной силы в механическую.

3. Уравнение электромагнитной силы, представляющее собой энергетические преобразования и отражающее функцию запаса энергии W_m , заключающуюся в магнитном поле электромагнитного привода:

$$F_3 = f_3(W_m), \quad (3)$$

4. Уравнение перемещения подвижной части магнитопровода электромагнитного привода:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = F_3 - F_{\pi} - F_c \left(\frac{dx}{dt} \right), \quad (4)$$

где x – перемещение якоря; m – масса подвижной части магнитопровода; $F_c(dx/dt)$ – сила сопротивления, зависящая от скорости движения.

Вышеприведенное уравнение (4) позволяет охарактеризовать механические процессы, происходящие при переключении электромагнитного привода.

5. Уравнение охлаждения и нагрева электромагнитного привода отражает зависимость температуры нагрева ϑ и мощностью P , выделяющейся в рабочей катушке, габаритами электромагнитного привода и временем работы $t_{\text{вкл}}$:

$$\vartheta = f_4(P, t_{\text{вкл}}, \text{размеры}), \quad (5)$$

Таким образом, рассмотренные уравнения с (1) по (5) отражают наиболее значимые характеристики электромагнитного привода.

Важнейшими характеристиками электромагнитного привода с точки зрения его функциональных возможностей являются следующие:

1. Статическая тяговая характеристика электромагнита, которая отражает зависимость электромагнитной силы от рабочего зазора

магнитопровода при постоянных значениях напряжения, подведенного к рабочей катушке $F_3 = f_1(\delta)|_{U=\text{const}}$, или тока I в рабочей катушке $F_3 = f_1(\delta)|_{I=\text{const}}$.

2. Сила противодействия электромагнитного привода отражена зависимостью всех противодействующих сил от рабочего зазора $F_n = f(\delta)$.

3. Время переключения электромагнитного привода – это время, исчисляемое с момента подведения напряжения к рабочей катушке и до перемещения подвижной части магнитопровода электромагнита в заданное положение.

4. Зависимость потокосцепления от тока в обмотке при заданных значениях рабочего зазора $\Psi = f(i)|_{\delta=\text{const}}$.

Некоторые из вышеприведенных характеристик показаны на рисунке 3, где Ψ_n и I_n – номинальные значения потокосцепления и тока соответственно.

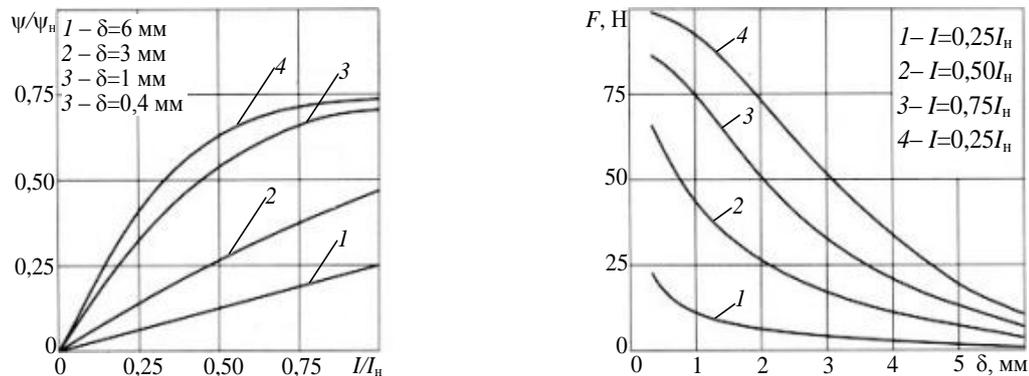


Рис.3. – Статические характеристики электромагнитных приводов.

Влияние конструкции электромагнита отражено в тяговой характеристике [5]. На рисунке 3 приведены зависимости $F_3 = f(\delta)|_{I=\text{const}}$ для различных форм подвижной части магнитопровода электромагнитного привода. В современных автоматических системах для высокоточного управления различными процессами, например при подаче топлива в систему в двигателях внутреннего сгорания, зачастую используются пропорциональные втягивающие электромагнитные приводы, отличительной особенностью которых является присутствие линейного участка тяговой

характеристики (рисунок 4). Вид тяговой характеристики зависит от размеров и положения немагнитной вставки.

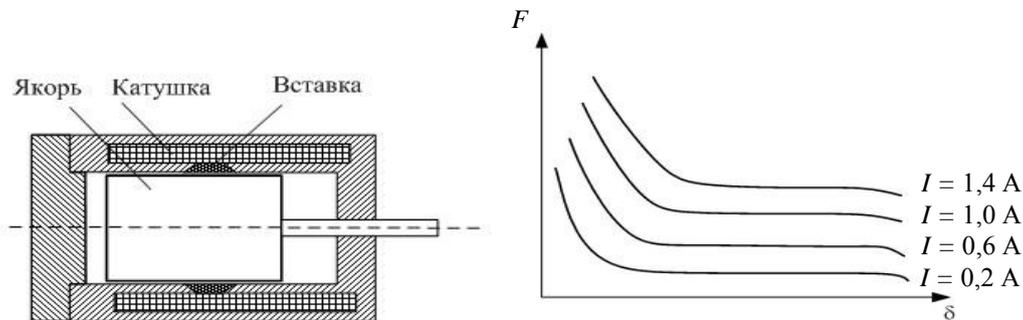


Рис.4. – Пропорциональный втяжной электромагнит (а) и его тяговые характеристики (б).

В [9, 10] в качестве основной характеристики электромагнита рассматривается вебер-амперная характеристика (ВАХ), так как большинство характеристик, используемых при приемо-сдаточных испытаниях, зависят от потокосцепления, тока или зазора $\psi = f_7(I, \delta)$.

Вебер-амперная характеристика электромагнитного привода изображена на рисунке 5 [11]. На электромагнитный привод подается напряжение питания. После этого, ток в рабочей катушке возрастает до значения тока, достаточного для перемещения подвижной части магнитопровода (точка 1). В этот момент происходит перемещение подвижной части магнитопровода, в процессе которого уменьшается рабочий зазор δ , индуктивность рабочей катушки возрастает, и ток падает, пока якорь не притянется к сердечнику (точка 2). При движении подвижной части магнитопровода электромагнитного привода, зависимость между потокосцеплением ψ и тока I определяется кривой 1-2. По завершению перемещения подвижной части магнитопровода ток вновь возрастает, достигая установившегося значения (точка 3).

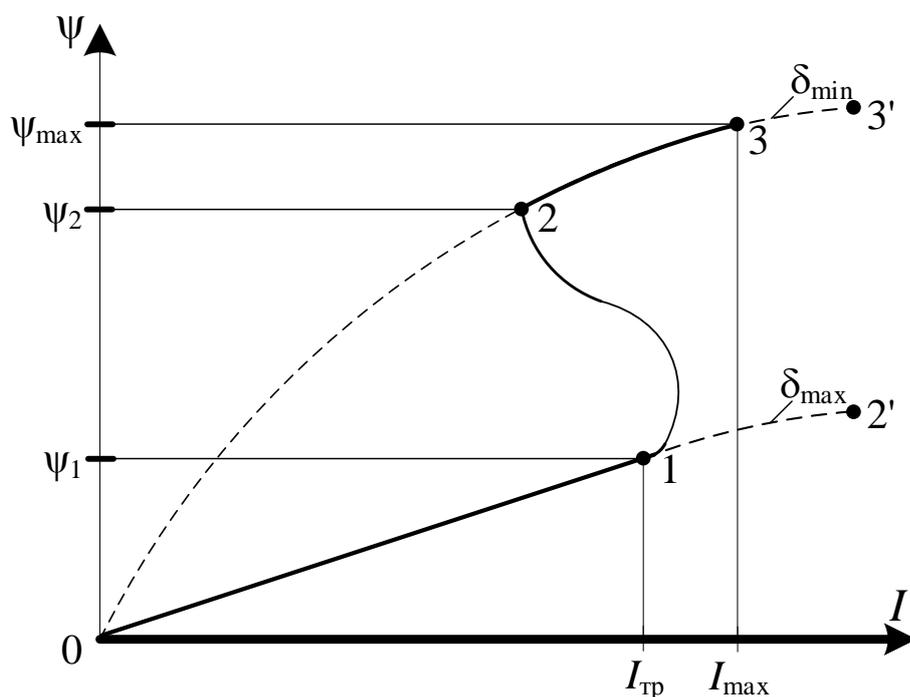


Рис.5. – Вебер-амперная характеристика рабочего цикла электромагнита.

Заключение

Таким образом можно сделать вывод о том, что среди основных характеристик электромагнитов: тяговой, время-токовой и вебер-амперной более информативной является ВАХ, потому что она интегрально отражает как магнитные характеристики магнитопровода, так и электрические, что делает возможным использовать ее для комплексного испытания электромагнитов и других электротехнических изделий [12].

Литература

1. Браганец С.А., Гольцов А.С., Савчиц А.В. Система диагностики технического состояния главного золотника и сервомотора электрогидравлического преобразователя системы управления открытием направляющего аппарата гидроагрегата Волжской ГЭС. // Инженерный вестник Дона, 2013, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1912.

2. Беляев А.И., Овсянников А.Ю., Лапковский К.А., Дорофеев Е.А. Вейвлет-преобразования как метод диагностики энергетических машин // Инженерный вестник Дона, 2014, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2015/3464.
 3. Коротеев И., Жуков В., Касперк Р. Электротехнические системы. М.: CRC Press, 2010. 268 с.
 4. Сергеев В.Г., Шихин А.Я. Магнитоизмерительные приборы и установки. М.: Энергоатомиздат, 1982. 152 с.
 5. Frank W. Roller Electric and Magnetic Measurements and Measuring Instruments HardPress, 2012. 414 p.
 6. Гордон А.В., Сливинская А.Г. Электромагниты постоянного тока М.: Государственное энергетическое издательство, 1960. 447 с.
 7. Сливинская А.Г. Электромагниты и постоянные магниты. Учебное пособие для студентов вузов. М.: Энергия, 1972. 248 с.
 8. Татевосян А.С., Пимонова У.В. Аппаратно-программный измерительный комплекс для исследования динамики электромагнита постоянного тока // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность! (Омск, 17 октября 2016 г.). - Омск: Издательство Омского государственного технического университета, 2016. – С. 329-332.
 9. Шайхутдинов Д.В., Горбатенко Н.И., Широков К.М., Гречихин В.В., Ланкин А.М. Адаптивная подсистема автоматического управления производством интеллектуальных электроприводов // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – №1. URL: science-education.ru/125-20095
 10. Gadyuchko A., Kallenbach E. Magnetic Measurement - New ways of functional testing in the production of magnetic actuators. Innovative small and micro drive technology. 2010. pp. 59-64.
-

11. Ruderman M., Gadyuchko A. Phenomenological Modeling and Measurement of Proportional Solenoid with Stroke-dependent Magnetic Hysteresis Characteristics. IEEE International Conference on Mechatronics. 2013. pp. 180-185.

12. Mason A., Mukhopadhyay S. C., Jayasundera K. P., Sensing Technology: Current Status and Future Trends. Springer Science & Business Media. 2013. 273 p.

References

1. Braganecz S.A., Gołczov A.S., Savchicz A.V. Inzhenerny`j vestnik Dona, 2013, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1912.

2. Belyaev A.I., Ovsyannikov A.Yu., Lapkovskij K.A., Dorofeev E.A. Inzhenerny`j vestnik Dona (Rus), 2014, №3 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2015/3464.

3. Koroteev I., Zhukov V., Kasperk R. E`lektrotexnicheskie sistemy` [Electrotechnical systems]. M.: CRC Press, 2010. 268 p.

4. Sergeev V.G., Shixin A.Ya. Magnitoizmeritel`ny`e pribory` i ustanovki [Magnetic measuring instruments and installations]. M.: Energoatomizdat, 1982. 152 p.

5. Frank W. Roller Electric and Magnetic Measurements and Measuring Instruments. HardPress, 2012. 414 p.

6. Gordon A.V., Slivinskaya A.G. E`lektromagnity` postoyannogo toka [DC Electromagnets]. M.: Gosudarstvennoe e`nergeticheskoe izdatel`stvo, 1960. 447 p.

7. Slivinskaya A.G. E`lektromagnity` i postoyanny`e magnity` [Electromagnets and permanent magnets]. Uchebnoe posobie dlya studentov vuzov. M.: E`nergiya, 1972. 248 p.

8. Tatevosyan A.S., Pimonova U.V. Izdatel`stvo Omskogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta, 2016. pp. 329-332.



9. Shajxutdinov D.V., Gorbatenko N.I., Shirokov K.M., Grechixin V.V., Lankin A.M. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya*. 2015. №1. URL: science-education.ru/125-20095
10. Gadyuchko A., Kallenbach E. *Innovative small and micro drive technology*. 2010. pp. 59-64.
11. Ruderman M., Gadyuchko A. *IEEE International Conference on Mechatronics*. 2013. pp. 180-185.
12. Mason A., Mukhopadhyay S. C., Jayasundera K. P., Bhattacharyya N. *Sensing Technology: Current Status and Future Trends*. Springer Science & Business Media. 2013. 273 p.