



УДК 62-184

ОБЗОР И АНАЛИЗ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЛЯ ОЦЕНКИ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ

Ковылин С.С., Ядыкин Д.В.

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

Тренд на миниатюризацию и снижение материалоемкости современных электротехнических изделий переменного тока, предъявляет повышенные требования к качеству их отдельных элементов. Все электротехнических изделий 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 так же количеством витков в ней и величиной протекающего тока. В течение рабочего цикла электротехнических изделий переменного тока подвижная часть магнитопровода перемещается относительно неподвижной, что так же 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 так же 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.

MO REVIEW AND ANALYSIS OF INTEGRATED CHARACTERISTICS FOR THE ESTIMATION OF THE FUNCTIONAL CONDITION OF ELECTRO- MAGNETS

Kovylin S.S., Yadykin D.V.

Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk

The trend to miniaturize and reduce the material consumption of modern electrical products of alternating current, places increased demands on the quality of their individual elements. All electrical products of alternating current (electromagnets, electromagnetic relays, motors) have a moving and fixed parts of the magnetic circuit and at least one working coil. During the operation of electrical products of alternating current, a current flows in the working coil, a



working magnetic flux is created in the fixed part of the magnetic circuit, which sets in motion its movable part. The magnitude of the magnetic flux is determined by the design, the mutual arrangement of the parts of the magnetic circuit and the working coil, as well as the number of turns in it and the magnitude of the flowing current. During the working cycle of electrical products of alternating current, the moving part of the magnetic circuit moves relatively stationary, which also leads to a change in the magnetic flux. It is required to know their mechanical, electrical and magnetic properties. Each group of indicators requires the use of its own methods and means of testing electrical products of alternating current. This situation stimulates the search for the integral characteristics of electrical products of alternating current, which allow to draw conclusions about the quality of individual parts and operational properties of the entire product. The article proposes to use the web-ampere characteristic of the operating cycle as an integral characteristic of an electromagnet. To obtain the weber - ampere characteristic of electrical products of alternating current, it is necessary to influence the magnetic circuit with an external varying magnetic field and measure the magnetic flux arising in its cross section with a special sensor. When determining the weber - ampere characteristic of the working cycle, the electrotechnical product of alternating current in assembled form is subjected to testing, which makes it impossible to use magnetic flux sensors. Therefore, the use of existing measurement methods is not possible and therefore it is necessary to develop a method for determining the weber - ampere characteristic of the operating cycle of AC electrical products, which has acceptable accuracy and does not require the use of additional sensors.

Keywords: electromagnets, integral characteristics, functional state assessment, magnetic measurements.

Введение

В настоящее время сфера электротехники развивается широкими шагами. 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 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.

Электромагниты как объект исследования

Рассмотрим подробнее ЭИПТ на примере электромагнита, его эксплуатационные характеристики и особенности с точки зрения процесса контроля их работоспособности [1, 2].

Электромагниты – это электротехнические изделия, позволяющие создавать в определенном месте пространства магнитное поле при помощи рабочей катушки под действием электрического тока [3, 4]. 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).

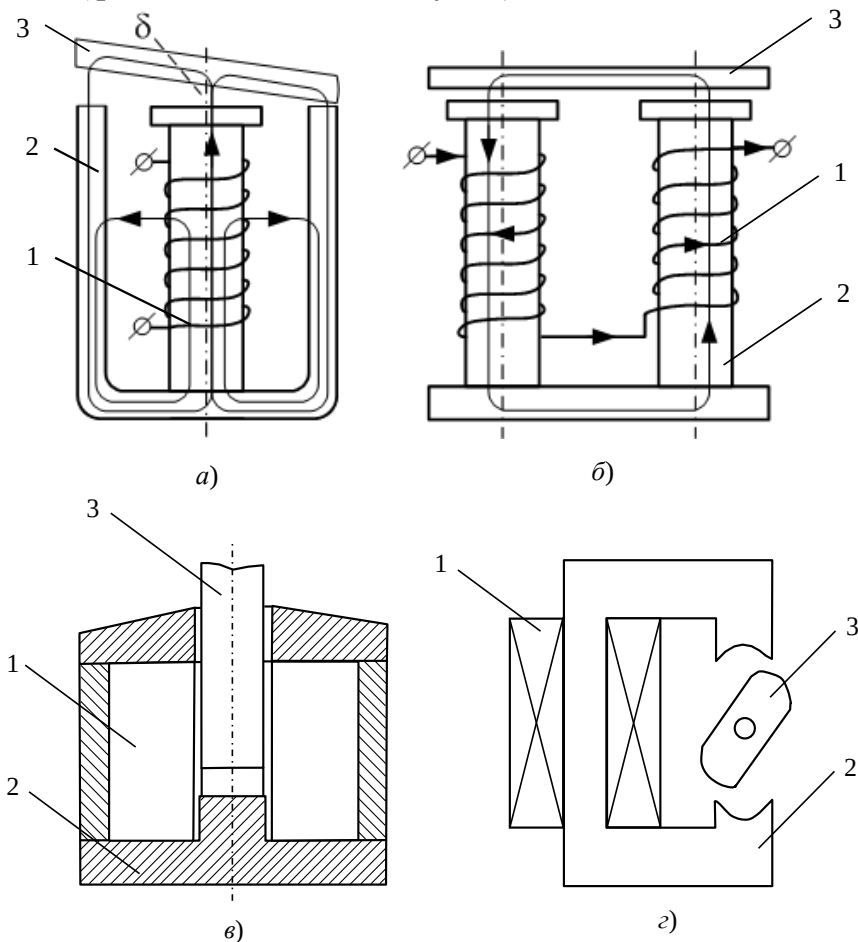


Рис.1. – Наиболее распространенные виды электромагнитных приводов

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

Процесс работы электромагнитного привода может быть выражен, приведенной на рисунке 2, структурной схемой [5]. 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 [6]:

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, но 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 [4, 7]:

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.

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.

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

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

Уравнение перемещения подвижной части магнитопровода электромагнитного привода:

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

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.

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

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

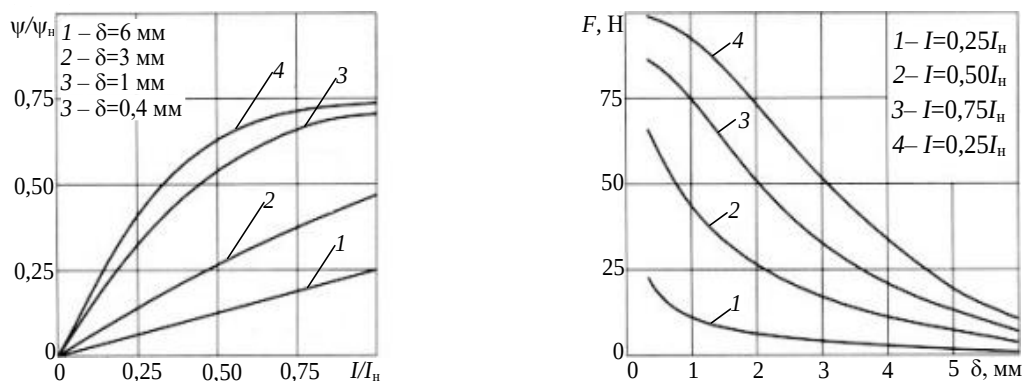


Рис.3. – Статические характеристики электромагнитных приводов

Влияние конструкции электромагнита отражено в тяговой характеристике [4]. На рисунке 3 приведены зависимости $F_\delta = f(\delta)_{I=\text{const}}$ 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.

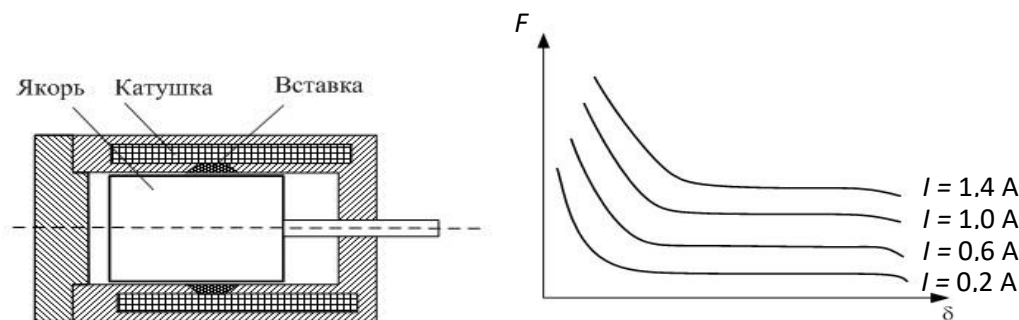


Рис.4. – Пропорциональный втяжной электромагнит (а) и его тяговые характеристики (б)

В [8, 9, 10] в качестве основной характеристики электромагнита рассматривается вебер-амперная характеристика (ВАХ), так как большинство характеристик, используемых при приемо-сдаточных испытаниях, зависят от потокоцепления, тока или зазора $\psi = f_7(I, \delta)$.

Вебер-амперная характеристика электромагнитного привода изображена на рисунке 5 [11, 12]. 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 подвиж-



ной части магнитопровода электромагнитного привода, зависимость между потоко-
сцепления Ψ и тока I определяется кривой 1-2. По завершению перемещения
подвижной части магнитопровода ток вновь возрастает, достигая установивше-
гося значения (точка 3).

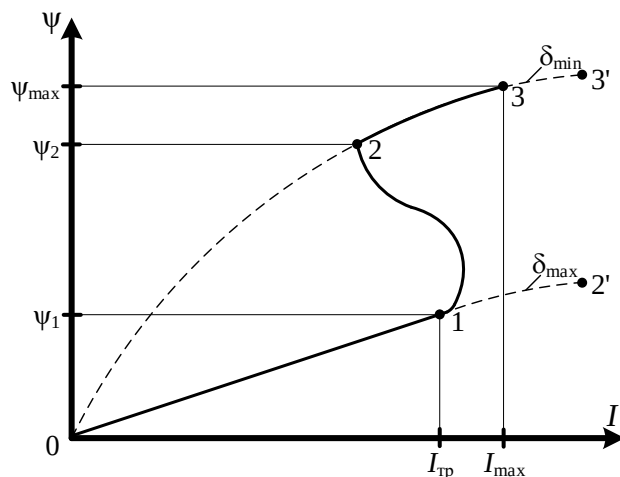


Рис.5. – Вебер-амперная характеристика рабочего цикла электромагнита

Вывод

Таким образом можно сделать вывод о том, что среди основных характери-
стик электромагнитов: тяговой, время-токовой и вебер-амперной более информа-
тивной является ВАХ, потому что она интегрально отражает как магнитные ха-
рактеристики магнитопровода, так и электрические, что делает возможным ис-
пользовать ее для комплексного испытания электромагнитов и других электро-
технических изделий.

Список цитируемой литературы

1. Коротеев И., Жуков В., Касперк Р. Электротехнические системы. М.: CRC Press, 2010. 268 с.
2. Сергеев В.Г., Шихин А.Я. Магнитоизмерительные приборы и установки. М.: Энергоатомиздат, 1982. 152 с.
3. Frank W. Roller Electric and Magnetic Measurements and Measuring Instruments HardPress, 2012. P. 414.
4. Гордон А.В., Сливинская А.Г. Электромагниты постоянного тока М.: Государственное энергетическое издательство, 1960. 447с.
5. ГОСТ 19264-1982. Электромагниты управления. Общие технические условия. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.gostedu.ru/30095.html> (дата обращения: 18.01.2019)
6. Сливинская А.Г. Электромагниты и постоянные магниты. Учебное пособие для студентов вузов. М.: Энергия, 1972. 248 с.
7. 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.
8. 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:<http://www.science-education.ru/125-20095> (дата обращения: 18.01.2019).
9. Gadyuchko A., Kallenbach E. Magnetic Measurement - New ways of functional testing in the production of magnetic actuators. Innovative small and micro drive technology. 2010. P. 59-64.



10. Ruderman M., Gadyuchko A. Phenomenological Modeling and Measurement of Proportional Solenoid with Stroke-dependent Magnetic Hysteresis Characteristics. IEEE International Conference on Mechatronics. 2013. P. 180-185.
11. Mason A., Mukhopadhyay S. C., Jayasundera K. P., Sensing Technology: Current Status and Future Trends. Springer Science & Business Media. 2013. P. 273.
12. Luecke G. Analog and Digital Circuits for Electronic Control System Applications. Newnes. 2005. P. 312.

© С.С. Ковылин, Д.В. Ядыкин, 2019