

ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ КРУГЛОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТА ПОДВЕСНОГО ЖЕЛЕЗОТДЕЛИТЕЛЯ

Розроблено методику оптимального проектування круглого електромагніта підвісного залізовідокремлювача, яка дозволяє вибрати оптимальну конфігурацію магнітної системи з метою мінімізації витрат як у сфері виробництва, так і у сфері експлуатації.

Разработана методика оптимального проектирования круглого электромагнита подвешенного железотделителя, позволяющая выбрать оптимальную конфигурацию магнитной системы с целью минимизации затрат как в сфере производства, так и в сфере эксплуатации.

ВВЕДЕНИЕ

При проектировании электромагнитных систем железотделителей главной задачей является обеспечение необходимого извлекающего усилия в рабочей зоне, т.е. создание необходимой пондеромоторной силы магнитного поля. Как показывает практика проектирования магнитных систем, достижение заданной пондеромоторной силы возможно для нескольких вариантов размеров одной и той же магнитной системы. Возникающая при этом задача выбора из всех возможных вариантов наилучшего на основе того или иного критерия в настоящее время не имеет общепризнанной методики решения.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является разработка методики оптимального проектирования электромагнитных систем железотделителей.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При оптимальном проектировании электромагнитных систем важным является выбор критериев, по которым будет выбираться наилучший вариант. Для электромагнитных железотделителей такими критериями могут быть масса активных материалов (обмоточный провод и железо магнитопровода), и потребляемая мощность. Таким образом, на основе вышечисленных критериев при проектировании электромагнитной системы железотделителя в каждом конкретном случае можно обоснованно выбрать наилучший вариант из всего множества решений.

Рассмотрим в качестве оптимизируемой магнитной системы извлекающую магнитную систему подвешенного саморазгружающегося железотделителя, описанного в [1]. Задача синтеза электромагнитной системы сводится к определению геометрических размеров магнитопровода и электрических параметров обмотки намагничивания. Проектируемая магнитная система представляет собой электромагнитную шайбу с вырезом во внешнем кольцевом полюсе (рис. 1).

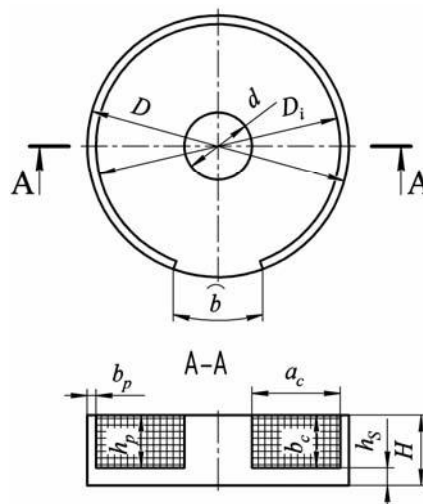


Рис. 1. Конструкция магнитной системы

Из рис. 1 видно, что геометрия магнитной системы определяется десятью размерами: D , D_i , d , b , b_p , h_p , b_c , h_c , H , h_s . Согласно рис. 1, можно записать следующие геометрические соотношения для основных размеров:

$$\begin{aligned} h_p &= b_c, & b_p &= (D - D_i)/2, \\ h_s &= H - h_p, & D_i &= d + 2a_c. \end{aligned} \quad (1)$$

При расчете магнитной системы так же следует учесть, что ряд геометрических размеров задается исходя из условий ее применения. Так размер b , определяющий ширину немагнитного зазора во внешнем полюсе, определяется исходя из крупности извлекаемого материала. Размер D , определяющий наружный диаметр магнитной системы задается исходя из габаритных размеров железотделителя (ширины ленты основного конвейера).

Для однозначного определения геометрических размеров магнитной системы необходимо определить еще ряд соотношений. Эти соотношения можно записать, основываясь на том, что они должны учитывать особенности процессов, происходящих в рассматриваемом электромагните, в частности в его магнитопроводе. Для этого необходимо принять во внимание, что магнитопровод служит для направления магнитного потока без рассеяния в рабочую зону, поэтому площадь сечения магнитопровода по всей длине пути магнитного потока должна быть одинаковой и равной площади сечения центрального полюса.

$$\begin{aligned} S_c &= S_s, \\ S_c &= S_p. \end{aligned} \quad (2)$$

где S_c , S_s , S_p – соответственно площади сечений сердечника, ярма и полюса.

$$\begin{aligned} S_c &= \pi d^2 / 4, \\ S_s &= h_s \pi d, \\ S_p &= b_p \left(\frac{D + D_i}{2} \pi - b \right). \end{aligned} \quad (3)$$

Таким образом, для рассматриваемой магнитной системы (рис. 1), имеем два заданных размера (D и b) и шесть соотношений (1) и (2) для геометрических размеров. Следовательно, определив численные значения двух размеров, можно считать решенной задачу синтеза магнитной системы. Примем, что определяемыми размерами будут диаметр d и высота h_p сердечника.

Для определения размеров d и h_p учтем, что назначением любого электромагнита железоотделителя является обеспечение необходимой подъемной силы на заданном расстоянии от поверхности полюсов магнитной системы, которая обеспечивается определенной напряженностью магнитного поля. Выполнить это условие можно, проведя соответствующий расчет магнитной системы, заключающийся в нахождении такой магнитодвижущей силы обмотки, которая создает требуемое значение напряженности магнитного поля. Этот расчет и является связью между геометрическими размерами магнитной системы и ее электромагнитными параметрами. Но для выбора оптимальной конфигурации магнитной системы выполняя магнитный расчет, необходимо контролировать не только напряженность магнитного поля, но и указанные выше критерии. В результате выполненного таким образом расчета получим для каждой пары размеров d и h_p , удовлетворяющих условию получения необходимой напряженности магнитного поля, определенные значения критериев оптимизации (масса меди обмотки, масса стали магнитопровода, потребляемая мощность). Целесообразным является проводить оптимизацию относительно каждого критерия в отдельности, а затем, в зависимости от тех или иных потребностей производства либо потребителя, выбирать наиболее приемлемый вариант. При этом соответствующая задач выбора рациональных параметров проектируемого электромагнита может быть охарактеризована как нестрогая однокритериальная задача оптимизации. Поскольку основными геометрическими размерами электромагнита, через которые можно определить все остальные, являются d и h_p , то в данном случае задача нестрогой однокритериальной оптимизации является двумерной (относительно d и h_p) с функциями ограничений в виде уравнений задачи синтеза и габаритных ограничений и функцией цели в виде критериев оптимизации, описанных выше.

В виду того, что рассматриваемая магнитная система является трехмерной, ее расчет представляет собой довольно трудоемкую задачу, и поэтому является целесообразным выполнение расчета с применением ЭВМ и соответствующего программного обеспечения. В связи с этим для решения задачи оптими-

зации магнитной системы был выбран метод перебора (или сканирования). Несмотря на то, что основным недостатком метода перебора является большой объем вычислений, с применением современных ЭВМ, обладающих высокими скоростями счета, с этим недостатком можно смириться. Кроме того, при применении метода перебора представляется весьма существенный выигрыш во времени, который имеет место при непосредственном программировании методов перебора для реализации решения на ЭВМ. При этом, поскольку из всех методов сканирования самым простым и надежным является метод простого перебора с постоянным шагом [2], то именно этот метод и был принят для поиска рациональных параметров при расчете поставленной задачи.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОПТИМИЗАЦИИ

Алгоритм, по которому выполняется расчет рациональных параметров, представлен на рис. 2. Для реализации данного алгоритма вычисления задачи синтеза был применен пакет Mathematica® компании Wolfram research.

Исходными данными для данной задачи являются размеры магнитопровода D и b , система соотношений (1) и (2), тип и размеры обмоточного провода и интервал допустимых значений размеров d и h_p , в пределах которого будет производиться сканирование.

Тепловой расчет выполняется исходя из условия безаварийной работы обмотки электромагнита, заключающегося в обеспечении такого режима, при котором вся тепловая энергия, выделяющаяся в обмотке под действием электрического тока, в установленном тепловом режиме отводится от электромагнита – условие теплового баланса:

$$P_{\text{выд}} = P_{\text{отв}}, \quad (4)$$

где $P_{\text{выд}}$ – тепловая мощность, выделяемая обмоткой электромагнита; $P_{\text{отв}}$ – тепловая мощность, отводимая от электромагнита.

Определение мощности $P_{\text{отв}}$ для электромагнита всегда представляло собой большую трудность в виду того, что тепловые процессы в обмотке электромагнита зависят от многих факторов. Поэтому получить аналитически точное выражение для $P_{\text{выд}}$ не представляется возможным и поэтому в практике электроаппаратостроения принято определять $P_{\text{отв}}$ опытным путем для конкретной конструкции и определенных условий теплоотдачи.

Для определения $P_{\text{отв}}$ была использована формула, полученная на основе проведения испытаний серийно выпускаемых железоотделителей [3]

$$P_{\text{отв}} = 500,814 S_{\text{охл}}^{-0,1642314} \cdot 10^{-3} S_{\text{охл}}, \quad (5)$$

где $S_{\text{охл}}$ – площадь наружной поверхности обмотки электромагнита, определяемая как сумма площадей внутренней, наружной и торцевой поверхностей обмотки.

Выделяемая тепловая мощность $P_{\text{выд}}$ определяется по формуле:

$$P_{\text{выд}} = I_{\text{обм}}^2 R_{\text{обм}}, \quad (6)$$

где $I_{\text{обм}}$ – постоянный электрический ток, протекающий через обмотку, $R_{\text{обм}}$ – активное сопротивление

обмотки в установившемся тепловом режиме. Сопротивление $R_{обм}$ находим, зная число витков w обмотки и среднюю длину $l_{ср}$ витка. Значения w и $l_{ср}$ определяем, зная размеры обмоточного окна (для текущей итерации алгоритма оптимизации), размеры и тип обмоточного провода, и исходя из того, что обмотка занимает все обмоточное окно. Тогда, при известном $R_{обм}$ и сопоставляя равенства (4) и (6) определяем ток, протекающий через обмотку, при котором сохраняется условие теплового баланса:

$$I_{обм} = \sqrt{P_{отв} / R_{обм}}. \quad (7)$$

Зная $I_{обм}$, можем найти магнитодвижущую силу, которую может обеспечить обмотка не нарушая условия теплового баланса:

$$F = I_{обм} w. \quad (8)$$

Полученная магнитодвижущая сила F является дополнительным входным параметром для магнитного расчета (наряду с геометрическими размерами магнитопровода).

Магнитный расчет выполняется средствами пакета Mathematica® и встраиваемого в нее модуля Radia®, специально разработанного для расчета трехмерных магнитных систем методом интегральных уравнений. Методика моделирования и расчета данной магнитной системы в модуле Radia® описана в [4].

ВЫПОЛНЕНИЕ РАСЧЕТА

Для примера по выше приведенному алгоритму был произведен расчет оптимальных параметров магнитной системы с наружным диаметром $D = 1200$ мм, которая проектировалась для сепарации материала крупностью до 300 мм. В связи с последним был выбран размер ширины немагнитного зазора во внешнем кольцевом полюсе $b = 400$ мм. Для данного материала были проведены исследования [5], в результате которых было определено, что для надежного извлечения металла необходимо, чтобы проектируемый электромагнит обеспечивал напряженность магнитного поля $H = 47750$ А/м на глубине 300мм. Шаг сканирования по размеру d был принят 25 мм, что является достаточным для определения оптимальных параметров магнитной системы с приемлемой точностью. Шаг сканирования по размеру h_p зависит от размера применяемого провода и определяется по формуле:

$$\Delta h_p = B_{пр} k_3, \quad (9)$$

где $B_{пр}$ – высота обмоточного провода с изоляцией, k_3 – коэффициент заполнения обмоточного окна в осевом направлении. Для намотки катушки был выбран провод прямоугольного сечения марки ПСДКТ (6,3×3,15) сечением $S = 19,85$ мм². Диапазон значений диаметра сердечника был выбран:

$$d_{min} \dots d_{max} = 250 \dots 600 \text{ мм.}$$

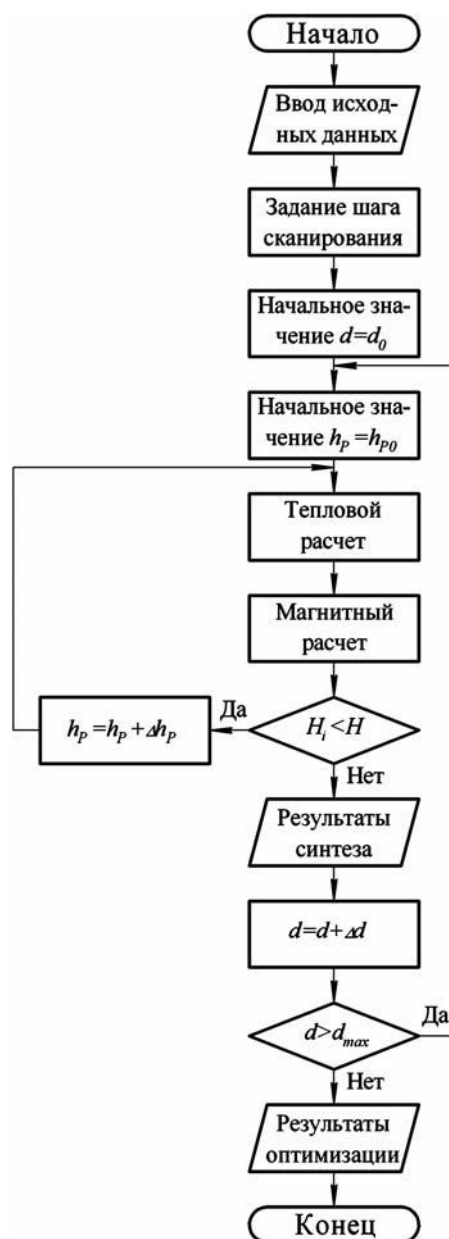


Рис. 2. Алгоритм оптимизации

При расчете обмотки было принято следующее допущение: согласно алгоритму (рис. 2) расчет проводится так, что при каждой следующей итерации высота обмотки увеличивается таким образом, чтобы поместился еще один слой витков, и следовательно число витков в обмотке увеличивается на число витков в слое. В связи с этим напряженность магнитного поля так же изменяется не плавно, а с определенной дискретностью. Поэтому расчет магнитной системы производился до получения напряженности магнитного поля, превышающей необходимое значение на минимально возможное значение. Для каждой пары размеров d и h_p магнитной системы получено свое значение напряженности магнитного поля, которое не отличается от заданного более, чем на 2%, что является вполне допустимым при проектировании таких магнитных систем.

Результаты расчета приведены в таблице и отображены в графическом виде на рис. 3.

Таблица

d	h_p	H	M_{Cu}	M_{Fe}	$P_{потр}$
250	225	48004,	1458,15	523	2652,29
275	218	47887,	1385,72	594	2612,73
300	218	48103,8	1340,27	678	2571,81
325	218	48385,1	1312,1	767	2552,8
350	218	48106,8	1264,12	854	2509,
375	218	47937,7	1233,19	946	2486,93
400	225	48235,8	1222,11	1063	2465,91
425	232	48303,4	1206,4	1181	2444,09
450	239	48154,7	1185,96	1314	2421,46
475	253	48317,2	1174,39	1477	2401,44
500	267	48604,6	1173,64	1645	2404,19
525	280	48608,2	1164,03	1823	2406,66
550	294	48338,1	1145,31	2026	2408,83
575	315	48088,2	1118,82	2271	2414,79
600	343	48172,	1099,09	2572	2448,06

Из полученных результатов видим, что с увеличением диаметра сердечника магнитной системы ее масса M_{Fe} так же постепенно возрастает, что объясняется уменьшением индукции в магнитной системе или

переводом ее работы в ненасыщенный режим и, как следствие, недоиспользование железа магнитной системы. С другой стороны, масса M_{Cu} обмотки (меди) постепенно снижается, а потребляемая мощность $P_{потр}$ приобретает минимальное значение при определенном значении d и h_p . Таким образом, на основании полученных результатов достаточно просто выбрать ту конфигурацию магнитной системы, которая требуется в том или ином конкретном случае. Так, если требуется достичь минимальной массы стали магнитной системы, то следует выбирать конфигурацию с максимальным насыщением магнитопровода (минимальным диаметром сердечника), если требуется достичь минимальной массы обмотки, то следует выбрать конфигурацию с возможно большим сечением сердечника. Если ставится задача минимизации потребляемой мощности электромагнита, т.е. минимизации затрат на его эксплуатацию, то согласно рис. 3, кривая, характеризующая изменение потребляемой мощности $P_{потр}$, имеет экстремум (минимальное значение) в точке, соответствующей диаметру сердечника $d = 475$ мм.

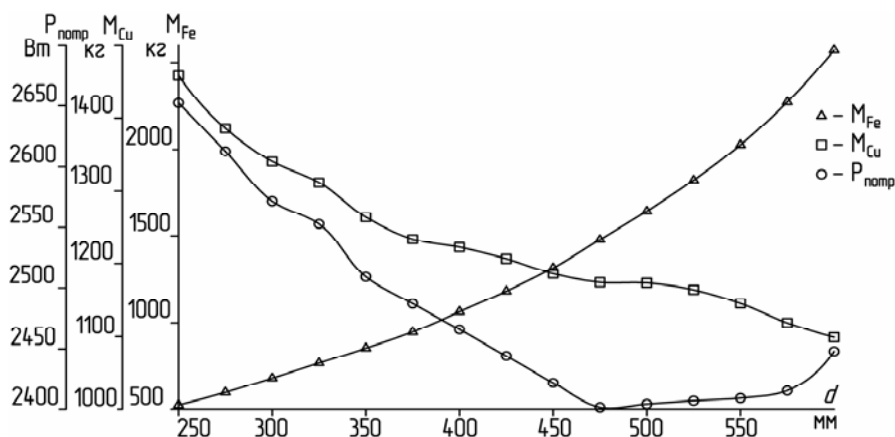


Рис. 3 Результаты оптимизации

Так же можно вывести любой агрегатный критерий выбора оптимальных параметров магнитной системы, например, критерий приведенной стоимости P_c , который позволяет учесть стоимость всех активных материалов (меди C_{Cu} и стали C_{Fe}):

$$P_c = M_{Fe} C_{Fe} + M_{Cu} C_{Cu}. \quad (10)$$

ВЫВОД

Предложенная методика позволяет выполнить расчет оптимальных параметров и размеров рассматриваемой магнитной системы с целью минимизации как производственных, так и эксплуатационных затрат.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Загирняк М. В., Кузнецов Н. И., Подорожный С.В. Новый подвесной электромагнитный железоотделитель для извлечения металла из шлака. Вісник КДПУ, 2004.– Вип. 1/2004 (24).
2. Аоки М. Введение в методы оптимизации. – М.: Наука, 1977. – 344 с.
3. Загирняк М.В., Усатюк В. М. Анализ результатов тепловых испытаний и расчет намагничивающих катушек элект-

ромагнитных сепараторов // Электротехника. – 1994. – № 1. – С. 54-58.

4. Загирняк М. В., Подорожный С.В. Разработка математической модели и расчет электромагнитного поля в рабочей зоне извлекающей магнитной системы подвесного сепаратора. Вісник КДПУ, 2006.– Вип. 5/2006 (40) Ч.1. – С.47–51.
5. Загирняк М.В., Власов В.Н., Подорожный С.В., Загирняк В.Е. Металлургические шлаки как объект магнитной сепарации. Праці Луганського відділення Міжнародної академії інформатизації, 2006, №2(13), – С.110–114.

Поступила 05.11.2008

Загирняк Михаил Васильевич, д.т.н., проф.
Кременчугский государственный политехнический университет имени Михаила Остроградского
Украина, 39614, Кременчуг, ул. Первомайская, 20, КДПУ, кафедра "Электрические машины и аппараты"
тел. (05366)3-62-19, e-mail: mzagirn@polytech.poltava.ua

Подорожный Станислав Владимирович, инж.
ГП ГПКИОО "Гипромашуглеобогащение",
Украина, Луганск, ул. В. Пятёркина, 30,
e-mail: stanislavp78@yandex.ru